

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

RODRIGO DELLA GIUSTINA MANERA

**IMPLEMENTAÇÃO DE CÉLULA ROBÓTICA NA FABRICAÇÃO DE PEÇAS E
ESCULTURAS DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

CAXIAS DO SUL

2026

RODRIGO DELLA GIUSTINA MANERA

**IMPLEMENTAÇÃO DE CÉLULA ROBÓTICA NA FABRICAÇÃO DE PEÇAS E
ESCULTURAS DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Mecânica da
Universidade de Caxias do Sul, como requisito
parcial à obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Me. Eng. Adelair Lino
Colombo

CAXIAS DO SUL

2026

RODRIGO DELLA GIUSTINA MANERA

**IMPLEMENTAÇÃO DE CÉLULA ROBÓTICA NA FABRICAÇÃO DE PEÇAS E
ESCULTURAS DE ROCHAS ORNAMENTAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador Prof. Me. Eng. Adelair Lino Colombo

Aprovado em 14/07/2026

Banca Examinadora

Prof. Me. Eng. Adelair Lino Colombo
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Me. Eng. Paulo Roberto Linzmaier
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Giovani Dambros Telli
Universidade de Caxias do Sul

Dedico esse trabalho à memória do meu pai, Alberto Manera, minha maior fonte de inspiração, exemplo de força, caráter e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força e pela sua sabedoria concedida durante toda essa jornada.

À minha mãe, Rosa, por todo amor, dedicação e apoio incondicional durante cada etapa da minha vida, isto sempre me sustentou nos momentos de dificuldade e me incentivou a continuar seguindo meus sonhos.

Ao meu irmão Roberto, que foi uma das principais razões pelas quais decidi ingressar no curso de engenharia, seu exemplo profissional e pessoal despertou em mim o interesse pela área e serviu como inspiração para que eu trilhasse o mesmo caminho com determinação e orgulho.

E de forma muito especial, ao meu pai Alberto, minha maior inspiração, mesmo não estando mais presente fisicamente, seu exemplo de esforço, caráter e amor pelo trabalho seguem vivos em cada conquista que eu alcanço. Tudo o que conquistei devo ao seu esforço. Este trabalho é dedicado à sua memória, como forma de gratidão por tudo o que me ensinou e pelo legado de valores que deixou.

Agradeço a empresa Marmoraria O Caminho das Pedras e toda a sua equipe, por permitir o uso do ambiente da empresa para que eu pudesse realizar o estudo e me apoiar durante essa jornada. A todos que de forma direta ou indireta, contribuíram nessa etapa, meus mais sinceros agradecimentos.

RESUMO

O setor de beneficiamento de rochas ornamentais, fundamental na economia, ainda depende fortemente de processos manuais de usinagem e acabamento, os quais exigem elevado esforço físico e expõem os trabalhadores a sérios riscos ergonômicos e ocupacionais, como ruído, vibrações e ambientes úmidos. Diante disso, este trabalho tem como objetivo central estudar e desenvolver a implementação de uma célula robótica aplicada à fabricação de peças e esculturas de rochas ornamentais. O estudo de caso foi conduzido na empresa Marmoraria O Caminho das Pedras, visando automatizar o processo produtivo para aumentar a produtividade, a padronização e a qualidade, além de minimizar os riscos à saúde do trabalhador.

A metodologia adotada consistiu no levantamento de dados do processo atual, na seleção de uma peça-piloto com curvas em 3D, no dimensionamento da célula robótica e na realização de simulações computacionais utilizando sistemas CAD/CAM (software Ency) para a geração de trajetórias e prevenção de colisões. O projeto utilizou o robô articulado KUKA KR 240-2 US, cuja análise de carga comprovou que o conjunto de ferramentas e esforços dinâmicos exigiram apenas 90,3 kg (cerca de 38%) de sua capacidade nominal que é de 240 kg, garantindo rigidez mecânica e operação sem vibrações prejudiciais. Para a validação, uma peça-piloto foi fabricada tanto pelo método manual quanto pelo processo robótico, permitindo uma análise comparativa de tempos, qualidade visual e precisão dimensional. Os resultados demonstraram que, embora o tempo total de produção líquido tenha sido semelhante (27h55min no manual e 26h18min no robótico), a automação reduziu o *lead time* da operação pela metade, caindo de 5 dias para 2,5 dias úteis, devido à capacidade de trabalho contínuo do robô sem necessidade de pausas por fadiga. Na análise de qualidade, a usinagem robótica produziu um acabamento de superfície uniforme e precisão milimétrica, com desvios dimensionais mínimos (de 0,1 mm a 2,4 mm), enquanto o processo manual apresentou variações orgânicas e desvios que chegaram a 16,9 mm em partes complexas da escultura.

Conclui-se que a implementação da célula robótica é uma solução tecnológica altamente viável e inovadora para o setor de rochas. A tecnologia integra os conceitos de engenharia mecânica e automação industrial, resultando não apenas em um ganho significativo no padrão estético exigido por mercados de alto padrão, mas também na melhoria direta na segurança operacional dos trabalhadores.

Palavras-chave: rochas ornamentais; robótica industrial; automação; célula robótica; usinagem.

ABSTRACT

The ornamental stone processing sector, a cornerstone of the economy, still relies heavily on manual machining and finishing processes. These methods demand significant physical exertion and expose workers to serious ergonomic and occupational hazards, such as noise, vibration, and damp environments. Consequently, this study aims to develop and implement a robotic cell for manufacturing ornamental stone parts and sculptures. The case study was conducted at the company Marmoraria O Caminho das Pedras with the goal of automating the production process to boost productivity, standardization, and quality, while also minimizing health risks to workers.

The methodology involved gathering data on the current process, selecting a pilot workpiece featuring 3D curves, sizing the robotic cell, and running computer simulations using CAD/CAM systems (Ency software) to generate toolpaths and prevent collisions. The project utilized a KUKA KR 240-2 US articulated robot; a load analysis confirmed that the combined tooling and dynamic forces required only 90.3 kg (approximately 38%) of the robot's 240 kg rated capacity, ensuring mechanical rigidity and vibration-free operation. To validate the approach, a pilot workpiece was produced using both manual and robotic methods, enabling a comparative analysis of production times, visual quality, and dimensional accuracy. The results showed that, although the net production time was similar (27h 55min for manual vs. 26h 18min for robotic), automation cut the operation's lead time in half—dropping from 5 days to 2.5 working days—thanks to the robot's ability to work continuously without needing breaks for fatigue. Quality analysis revealed that robotic machining produced a uniform surface finish and millimeter-level precision, with minimal dimensional deviations (ranging from 0.1 mm to 2.4 mm), whereas the manual process exhibited organic variations and deviations reaching up to 16.9 mm on complex sections of the sculpture.

It is concluded that the implementation of the robotic cell represents a highly viable and innovative technological solution for the stone industry. This technology integrates mechanical engineering and industrial automation concepts, resulting not only in a significant improvement in the aesthetic standards demanded by high-end markets but also in a direct enhancement of worker operational safety.

Keywords: ornamental stones; industrial robotics; Automation; robotic cell; machining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Robô cartesiano	26
Figura 2 – Exemplo de movimento robô cilíndrico.....	26
Figura 3 – Ilustração de um robô de coordenadas polares	27
Figura 4 – Exemplo de robô de revolução.....	28
Figura 5 – Robô de cadeia fechada.....	28
Figura 6 – Exemplo de um robô scara	29
Figura 7 – Exemplo de robô paralelo	29
Figura 8 – Comparativo conceitual entre braço humano com braço robótico.....	30
Figura 9 – Representação dos tipos de juntas.....	31
Figura 10 – Exemplo de graus de liberdade	31
Figura 11 – Centro de gravidade do punho	36
Figura 12 – Fluxograma de produção	37
Figura 13 – Volume de um braço articulado KUKA KR30HA	39
Figura 14 – Fluxograma	40
Figura 15 – Peça piloto.....	42
Figura 16 – Funcionário utilizando a serra mármore	46
Figura 17 – Instrumentos de desgaste.....	46
Figura 18 – Escultura utilizada no estudo	48
Figura 19 – Desenvolvimento das peças para corte	48
Figura 20 – Colagem do bloco para usinagem manual	49
Figura 21 – Início da usinagem	49
Figura 22 – Processo de acabamento.....	50
Figura 23 – Desbaste linha da água	50
Figura 24 – Etapas de desbastes	51
Figura 25 – Desbaste final da fresa D40X28X8.....	52
Figura 26 – Comparação entre fresas, D40X28X8 e D21X28X1D	52
Figura 27 – Desbastes 10, 11 e 12	53
Figura 28 – Desbaste rotativo e usinagem rotativa.....	53
Figura 29 – Demonstração de impacto	55
Figura 30 – Colagem do bloco para usinagem robótica	56
Figura 31 – Fixação do bloco na mesa giratória.....	56
Figura 32 – Desbaste primário.....	57
Figura 33 – Peça com usinagem primaria	57

Figura 34 – Usinagem secundária	58
Figura 35 – Acabamento fino	59
Figura 36 – Capacidade de carga do punho em função do deslocamento do centro de gravidade	62
Figura 37 – Vista frontal da peça fabricada pelo robô	65
Figura 38 – Comparação dos detalhes da peça robótica e manual, vista frontal	66
Figura 39 – Comparação das duas peças em mesma vista	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Modelos de robôs KUKA e suas aplicações.....	44
Tabela 2 – Parâmetros de usinagem	51
Tabela 3 – Parâmetros da última etapa de usinagem robótica.....	54
Tabela 4 – Desgaste das ferramentas.....	58
Tabela 5 – Tempo para produção manual.	63
Tabela 6 – Tempo para produção robótica	64
Tabela 7 – Medições obtidas das peças produzidas	67

LISTA DE ABREVIATURAS

a.C.	Antes de Cristo
mm	Milímetro
mm/s	Milímetro por Segundo
mm/min	Milímetro por Minuto
mm ³ /s	Milímetro cubico por Segundo
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
Kg	Quilograma
Kgf	Quilograma força
KPa	Quilopascal
µm	Micrômetro
W	Watt

LISTA DE SIGLAS

3D	Tridimensional
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador)
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i> (Manufatura Assistida por Computador)
CNC	<i>Computer Numerical Control</i> (Controle Numérico Computadorizado)
G-code	<i>Geometric Code</i> (Código Geométrico para Comando Numérico)
GL	Grau de Liberdade
IFR	<i>International Federation of Robotics</i> (Federação Internacional de Robótica)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização)
KR	<i>KUKA Robot</i> (Designação de modelo da série industrial KUKA)
RIA	Robotic Industries Association
RPM	Rotações Por Minuto
RS	Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

X_i	Distância do flange do robô, [m]
CM	Centro de massa
G	Grão de lixa, [μm]
m	Massa, [kg]
P_c	Pressão de contato, [kPa]
v_a	Velocidade de avanço, [mm/s]
v_f	Velocidade de deslocamento da ferramenta, [mm/s]
ω	Rotação, [rpm]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	20
1.2	JUSTIFICATIVA	20
1.3	OBJETIVOS	20
1.3.1	Objetivo geral	21
1.3.2	Objetivos específicos	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	TRABALHOS CORRELACIONADOS	22
2.2	DEFINIÇÃO DE UM ROBÔ	23
2.2.1	Leis fundamentais da robótica.....	23
2.3	ROBÔS NA INDÚSTRIA.....	24
2.4	TIPOS DE ROBÔS.....	25
2.4.1	Robô de coordenadas cartesianas ou pórtico	25
2.4.2	Robô de coordenadas cilíndricas	26
2.4.3	Robô de coordenadas polares (esférica).....	27
2.4.4	Robô de coordenadas de revolução (articulado).....	27
2.4.5	Robô SCARA.....	28
2.4.6	Robô paralelo	29
2.5	ANATOMIA DE UM ROBÔ.....	30
2.5.1	Juntas	30
2.5.2	Graus de liberdade.....	31
2.6	APLICAÇÕES DE ROBÔS	32
2.7	PARÂMETROS PARA DIMENSIONAMENTO DE UMA CÉLULA ROBÓTICA 33	
2.7.1	Dimensionamento do robô	33
2.7.2	Cálculos.....	34
2.8	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	36
2.8.1	Fabricação de chapas de pedra para marmoraria.....	36
2.8.2	Processo de fabricação das marmorarias	36
2.8.3	Utilização do braço robótico na fabricação de peças de mármore.....	37
2.9	ROCHAS ORNAMENTAIS	38
2.9.1	Mármore e granitos.....	38
2.10	VOLUME DE TRABALHO	39

3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	COLETA DE DADOS.....	40
3.1.1	Tipos de dados coletados	41
3.1.2	Métodos para coleta de dados.....	41
3.2	ESCOLHA DA PEÇA E MATERIAL PARA ESTUDO	41
3.3	ANÁLISE DO PROCESSO ATUAL	42
3.4	PESQUISA DE PROCESSOS.....	43
3.5	PARAMETRIZAÇÃO DA CÉLULA ROBÓTICA.....	43
3.6	SIMULAÇÃO E PROGRAMAÇÃO	44
3.7	COMPARAÇÃO ENTRE PROCESSO MANUAL E ROBÓTICO.....	45
4	RESULTADOS	46
4.1	FABRICAÇÃO ATUAL	48
4.2	PROGRAMAÇÃO E SIMULAÇÃO ROBÓTICA.....	50
4.2.1	Mapeamento de simulação de movimentos	55
4.3	FABRICAÇÃO DA PEÇA POR USINAGEM ROBOTICA	56
4.4	CARACTERIZAÇÃO DA CÉLULA ROBÓTICA INTEGRADA.....	59
4.4.1	Cálculo da Taxa de Remoção de Material.....	60
4.4.2	Cálculo da Potência de Corte.....	60
4.4.3	Velocidade Periférica de Corte	60
4.4.4	Determinação das Forças de Usinagem	61
4.4.5	Análise de Carga para o Robô KUKA KR 240-2.....	61
4.4.6	Análise de esforço no punho.....	62
4.5	ANÁLISE COMPARATIVA: PROCESSO MANUAL VS. ROBÓTICO.....	63
4.5.1	Tempo de produção	63
4.5.2	Análise visual.....	64
4.5.3	Análise dimensional	67
5	CONCLUSÃO	68
	REFERÊNCIAS	69
	APÊNDICE A	73

1 INTRODUÇÃO

O setor de beneficiamento de rochas ornamentais, que abrange materiais como mármore, granito e quartzitos ocupa um lugar relevante no cenário econômico brasileiro, tanto no mercado interno quanto nas exportações. Nas últimas décadas, o surgimento da Indústria 4.0 alavancou a competitividade industrial, fomentando investimentos em tecnologias que visam o aumento da produtividade e a redução de custos operacionais. Nesse contexto, máquinas CNC e braços robóticos destacam-se como pilares dessa nova era.

A implementação dessas tecnologias permite a automação de processos repetitivos e a mitigação de riscos à saúde ocupacional. No nicho de marmorarias, as etapas de beneficiamento variam conforme a aplicação do produto, consistindo basicamente em corte, usinagem, furação e polimento. A etapa de usinagem é fundamental para a qualidade final; entretanto, quando realizada de forma manual com o uso de politrizes e serras mármore, exige elevado esforço físico, destreza e atenção constante do operador.

Esse processo manual apresenta desafios críticos, como vibrações, ruídos elevados e exposição prolongada a ambientes úmidos e frios, devido ao uso de água no lixamento. Tais fatores elevam o risco de lesões musculares e doenças respiratórias, impactando a qualidade de vida do trabalhador e gerando alta rotatividade nas empresas.

Como solução, a aplicação de braços robóticos com sistemas dedicados tem sido consolidada. Por serem máquinas, a precisão de trajetória e a repetibilidade asseguram um acabamento uniforme e ganho significativo de produtividade.

Como forma de resolução, a aplicação de braços robóticos com sistemas próprios para esse tipo de aplicação tem sido cogitada. Por se tratar de uma máquina, fatores como trajetória e repetibilidade são aliadas para obter um acabamento uniforme, assim um ganho significativo da produtividade aliado com qualidade.

Este estudo analisou a viabilidade técnica e econômica do uso de robôs, fundamentando-se em conceitos de engenharia mecânica, para promover a evolução tecnológica em um setor onde a mão de obra humana ainda é predominantemente manual.

1.1 AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A Marmoraria Caminho das Pedras, situada no município de Antônio Prado – RS, foi fundada no ano de 2000 por Elton e Raul Torresan. Inicialmente focada na produção de pias e cozinhas sob medida, a organização expandiu sua atuação ao longo dos anos para a terceirização de peças, atendendo ao mercado moveleiro e de decoração com itens como mesas de jantar, buffets e tampos de centro.

A estrutura física da empresa compreende três pavilhões, totalizando aproximadamente 1.775 m² de área fabril. O quadro funcional é composto por 15 colaboradores e o parque tecnológico dispõe de equipamentos avançados, incluindo sistema de corte por jato d'água, serra ponte CNC de 5 eixos e máquinas poliborda para acabamentos automatizados.

1.2 JUSTIFICATIVA

A necessidade de manter um alto padrão de acabamento tornou o processo de usinagem uma etapa crucial para um resultado satisfatório. Contudo, essa parte do processo envolveu uma operação intensiva do operador, apresentando esforço físico elevado e alto tempo de produção, mesmo tratando-se de funcionários experientes.

Por atender a um mercado de alto padrão, existe uma alta variabilidade de formatos e tamanhos de peças, o que configurou um desafio para o processo estritamente humano. Além das questões produtivas, os fatores de ergonomia e segurança também foram pontos relevantes, visto que o trabalhador estava exposto a riscos gerados por vibrações, ruídos e partículas abrasivas, que com o passar do tempo poderiam acarretar problemas de saúde.

A implementação da tecnologia robótica possibilitou a redução de riscos ocupacionais e a eliminação de esforços repetitivos. Além disso, contribuiu para o aumento da produtividade uma vez que, diferente da mão de obra humana, a operação do maquinário mostrou-se contínua, parando somente para manutenções e troca de peças. Essa implementação garantiu maior eficiência no processo e fortaleceu a competitividade em novos mercados de atuação.

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho estão indicados na sequência.

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver um estudo sobre a implementação de uma célula robótica aplicada a fabricação de peças feitas em rochas ornamentais visando melhorias, como tempo de produção, acabamento, fidelidade ao projeto real e a redução de riscos ocupacionais causados pelo processo de produção manual.

1.3.2 Objetivos específicos

Para o alcance do objetivo geral deste estudo, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

1. Analisar o processo atual de fabricação das peças, pontuando os principais aspectos críticos que influenciam na produtividade, qualidade e segurança do funcionário.
2. Projetar e integrar a célula robótica.
3. Realizar simulações da usinagem em *software*.
4. Manufaturar um componente pelo processo atual e pela célula robótica.
5. Comparar os métodos de fabricação, em relação a qualidade visual e produtividade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica do trabalho agrupou conceitos e pontos essenciais para a compreensão da utilização de tecnologias como robôs industriais. Nessa etapa foi estudado temas fundamentais para a sustentação e desenvolvimento do projeto.

2.1 TRABALHOS CORRELACIONADOS

Souza e Pedron (2025) realizaram um estudo visando os benefícios da robótica na produção, aprofundado nos pontos positivos que essa tecnologia traz. Os benefícios atingidos fortalecem a ideia que essa tecnologia aumenta a eficiência e qualidade, também gerando melhorias ergonômicas e diminuição de riscos operacionais.

Almeida e Barborsa (2019) realizaram uma análise sobre a implementação de um sistema robótico com dispositivo controlador de força com a finalidade de polimento de rochas, visando atingir o objetivo de implementar uma célula robotizada através de uma série de diferentes soluções. Ao concluir o trabalho foi possível analisar que este ramo de atuação é pouco explorado, assim buscando informações nas próprias fábricas para parametrizar alguns dados.

Baptista (2016) desenvolveu um estudo sobre programação de robôs industriais, com foco na avaliação de como a programação impacta nos recursos de trabalho, e propôs diferentes operações relacionadas a tempo trajetória e potência. Concluindo que a ferramenta de programação CAD/CAM chamada de *mastercam/robomaster* é uma ferramenta muito útil para tarefas com múltiplas funcionalidades que implicam na trajetória da máquina.

Amaral e Gasparotto (2021) realizaram um estudo sobre o uso da robótica dentro da indústria 4.0, analisando as vantagens do uso dessa tecnologia, para a coleta de dados os autores analisaram artigos, teses, monografias e documentos sobre o tema. Concluindo que implementado esse tipo de tecnologia os impactos positivos são ganhos de eficiência, aumento de produtividade e também pontos negativos como ausência de mão de obra qualificada para operar e alguns tipos de ciberataques.

Gonçalves et al (2014) realizaram uma pesquisa sobre a soldagem robótica aplicada na indústria automobilística, com o objetivo de explorar processos de soldagem robótica e sua evolução no cenário automobilístico. Abordando assuntos como mecanização do processo, questões como produtividade e qualidade, programação da célula robótica, evoluções do

processo de soldagem, evidenciando um aumento da produtividade. Análise de questões socioeconômicas também foram discutidas, como salário de um operador humano, e também sobre os riscos à saúde que a solda gera.

Almeida e De Freitas (2017) apresentaram um estudo sobre células robóticas no setor de usinagem de peças automotivas, o trabalho avaliou os impactos na produção robotizada numa fábrica de rodas, com objetivo de avaliar a mão de obra manual e a robotizada. Resultados como baixas oscilações e produção mais estável foram obtidos na linha da produção robótica, já no manual uma maior oscilação de produtividade.

2.2 DEFINIÇÃO DE UM ROBÔ

Existem algumas definições sobre o que é um robô, segundo a *Robotic Industries Association* (RIA), “um robô industrial é um manipulador reprogramável, multifuncional, projetado para mover materiais, peças, ferramentas ou dispositivos especiais em movimentos variáveis programados para a realização de uma variedade de tarefas”. Em 2011 esta definição foi ampliada pela ISO (*International Organization for Standardization*), com a norma ISO 10218 “Um robô industrial é uma máquina para manipulação, com vários graus de liberdade, controlada automaticamente, reprogramável, multifuncional, que pode ter base fixa ou móvel para utilização em aplicações de automação industrial.”(SANTOS et al., 2015).

Para o ponto de vista científico, independentemente de sua aparência o robô é considerado uma máquina, com uma adaptabilidade de se moldar ao ambiente que está instalado, executando processos selecionados internamente, através de dados fornecidos do próprio ambiente, assim a robótica é definida como “a ciência que estuda a conexão inteligente entre percepção e ação”(SICILIANO et al., 2000).

2.2.1 Leis fundamentais da robótica

Criadas pelo russo Isaac Asimov (1950), também criador do termo robótico, que se caracteriza como o estudo dos robôs, leis foram desenvolvidas sobre o comportamento de um robô ou ferramenta semelhante, desde o estabelecimento destas, o significado de robô ganha mais um significado, que se enquadra em um produto industrial.

1. "Um robô não pode ferir um ser humano ou, por inação, permitir que um ser humano sofra algum mal."

2. "Um robô deve obedecer às ordens que lhe sejam dadas por seres humanos exceto nos casos em que tais ordens entrem em conflito com a primeira Lei."
3. "Um robô deve proteger a sua própria existência, desde que tal proteção não entre em conflito com a primeira ou segunda Leis."

Estas leis foram completadas em 1985 pela lei Zero de Asimov (1985).

0. "Um robô não pode causar mal à humanidade ou, por omissão, permitir que a humanidade sofra algum mal."

2.3 ROBÔS NA INDÚSTRIA

Lançados por meados de 1960, os primeiros robôs industriais, tinham alto valor de aquisição, se tornando inacessíveis para alguns públicos, sendo utilizados só por países mais desenvolvidos, como exemplo, Japão e Estados Unidos. No entanto, com o passar do tempo os preços começaram a reduzir, a partir de 1976, o valor de um robô sofreu uma queda tornando cada vez mais acessível, como responsável por essa baixa de valor a microeletrônica, disciplina que começou a ser explorada assim desenvolvendo novos métodos e processos (ROSARIO, 2010).

Com a invenção do computador na metade do século passado, dúvidas relacionadas a capacidade de pensar e agir de uma máquina robótica começaram a ser especuladas. Com o foco na implementação em indústrias para exercer tarefas difíceis e perigosas ao ser humano, apenas com a autonomia de produzir o que foram programados a fazer. Assim tendo foco em operações industriais antes executadas por humanos (CARRARA, 2015).

Para o contexto de manuseamento de materiais perigosos como urânio, durante a Segunda Guerra Mundial um dispositivo chamado “teleoperador” foi criado para fazer o transporte através de mecanismos motorizados, com controles realizados por meio de comandos remotos. Em paralelo a indústria de máquinas de usinagem também vinha ganhando avanços importantes através de controle numérico programados através de fitas perfuradas. Com isso George Devol reconhecido inventor norte-americano, criou uma máquina capaz de manipular e ser programada, para o setor industrial, Devol e o engenheiro Joe Engelberger, se juntaram e criaram a empresa Unimation, no ano de 1961, lançando seu primeiro robô chamado de Unimate (SANTOS et al., 2015).

Apresentando um valor elevado o Unimate, várias unidades foram adquiridas pela montadora General Motors, com objetivo de trabalhar no setor de forjaria. Mesmo com seu valor elevado provou ser uma solução economicamente viável, tanto na indústria automobilística como para outras fábricas (SANTOS et al., 2015).

Atualmente as indústrias utilizam em larga escala os robôs para a função de movimentadores. Com as atuais atualizações, como rede ethernet, fielbus ou conexões seriais, programados através de scripts, sua precisão está na casa dos décimos de milímetros, alta velocidade de movimento, com capacidades de centenas de quilos e com 6 eixos de trabalho (SANTOS et al., 2015).

2.4 TIPOS DE ROBÔS

No mercado atualmente existem tipos diferentes de robôs, nessa etapa apresentaremos alguns exemplos de robôs.

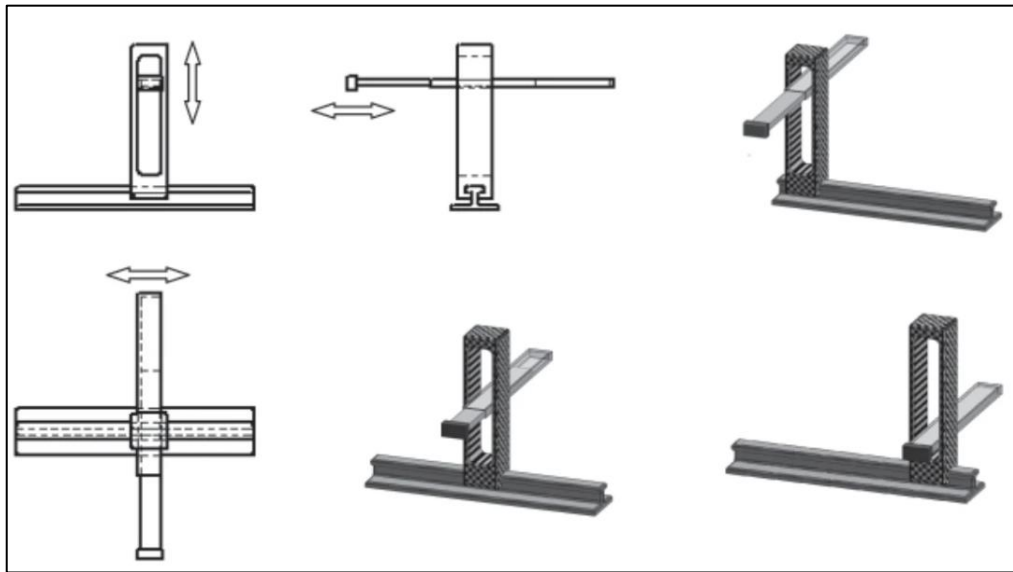
2.4.1 Robô de coordenadas cartesianas ou pórtico

Um robô de coordenadas cartesianas pode somente se movimentar em linhas retas, X, Y e Z, ou seja, é capaz de se movimentar somente horizontalmente e verticalmente, esses se caracterizam pela sua pequena área de trabalho, mas com a vantagem de um grau elevado de rigidez mecânica e exatidão de serviço (ROSARIO, 2010).

Também denominado de pórtico, esse tipo de robô utiliza três juntas lineares, é o robô de configuração mais simples, por ter somente 3 movimentos lineares. Esse robô opera dentro de um espaço de trabalho cúbico (CARRARA, 2015).

Nesse tipo de estrutura apresentada na Figura 1, três elos apresentam movimentos translacionais, atingindo assim uma melhor rigidez, mas apresenta uma baixa habilidade de posicionar objetos por ter limitações relacionadas a orientação angular com que realiza as tarefas. Usado principalmente para sistemas de armazenagem, para manipulação e movimentação (SANTOS et al., 2015).

Figura 1 – Robô cartesiano

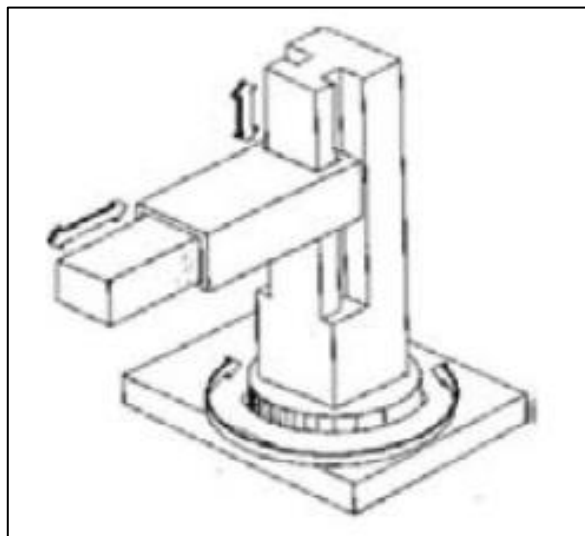


Fonte: Santos et al., (2015).

2.4.2 Robô de coordenadas cilíndricas

Envolvido em torno de uma base giratória, também chamada de junta de revolução, combina movimentos lineares com movimentos rotacionais, conforme mostrado na Figura 2, o movimento de rotação é feito em sua base, e dois movimentos lineares são feitos pela sua parte superior. Apresenta maior área útil de trabalho, porém sua rigidez mecânica é um pouco inferior comparado com o robô cartesiano, devido alguns momentos de inércia (ROSARIO, 2010).

Figura 2 – Exemplo de movimento robô cilíndrico

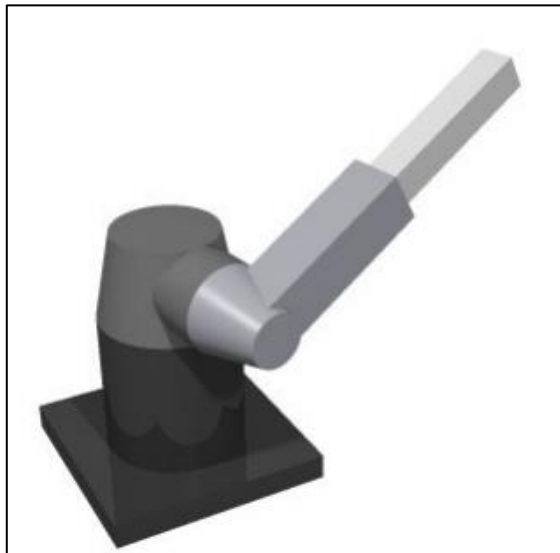


Fonte: Rosario (2010).

2.4.3 Robô de coordenadas polares (esférica)

Com o objetivo de ser usado para suportar grandes cargas e ter maior campo de alcance, esse tipo de robô tem sido utilizado maioritariamente em cargas e descargas de máquinas. Composto por duas juntas rotativas e uma junta prismática como visto na Figura 3, a primeira junta rotativa faz o movimento da base, ao redor de um eixo vertical, a segunda junta realiza o movimento do conjunto em um eixo horizontal, a junta prismática faz a função de movimentação linear da ponta do robô. Este tipo de braço não apresenta muito uso, pois está sendo substituído por braços de revolução (CARRARA, 2015).

Figura 3 – Ilustração de um robô de coordenadas polares

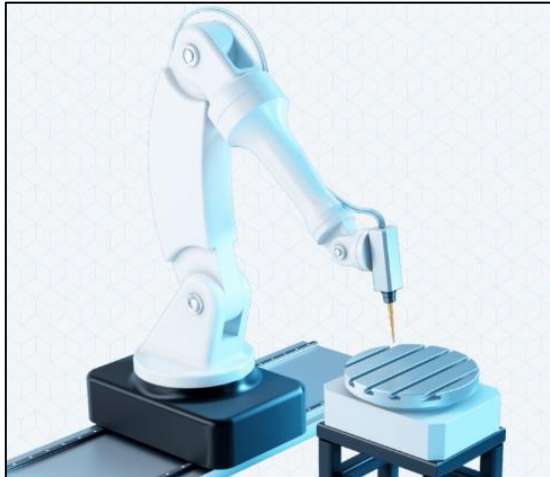


Fonte: Carrara (2015).

2.4.4 Robô de coordenadas de revolução (articulado)

De acordo com relatórios da Federação Internacional de Robótica (IFR), 50% dos manipuladores robóticos em operação são do tipo de revolução, também chamado robô de geometria antropomórfica. Composto por 3 juntas rotativas como apresentado na Figura 4, o eixo rotativo da primeira junta é ortogonal aos outros 2 eixos, por ter semelhança com a anatomia de um braço humano a segunda junta é chamada de articulação do ombro, e a terceira de articulação de cotovelo, assim conectando o braço ao antebraço. Por ter todas as juntas rotativas esse tipo de robô é mais eficiente em comparação com os outros, por isso a gama de aplicações industriais desse tipo é maior (SICILIANO et al., 2000).

Figura 4 – Exemplo de robô de revolução



Fonte: Comac (2025).

Os robôs desse tipo podem ser de cadeia aberta ou cadeia fechada, para distinguir os tipos de cadeias é só fazer uma análise visual do braço robótico. O tipo cadeia fechada apresenta uma estrutura formada por elos e articulações externas ao braço conforme a Figura 5 apresenta, já no tipo cadeia aberta não vemos esse tipo de estrutura, pois usa somente os eixos rotativos (CARRARA, 2015).

Figura 5 – Robô de cadeia fechada



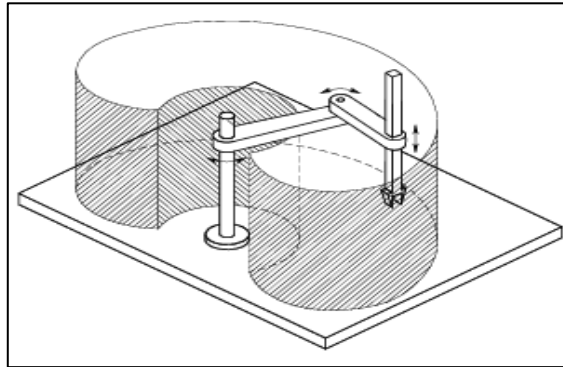
Fonte: Kuka robotics (2025).

2.4.5 Robô SCARA

Compacto e com grande precisão de trabalho e capacidade de processos altamente repetitivos, o robô SCARA (*selective compliance assembly robot arm*), ou braço robótico de montagem com complacência seletiva, tem características que o tornam um excelente

montador, tanto em montagem mecânicas ou eletrônicas, que exigem alta precisão, com duas juntas rotativas e uma junta linear, como mostra a Figura 6, apresenta área de trabalho cilíndrica (CARRARA, 2015).

Figura 6 – Exemplo de um robô scara

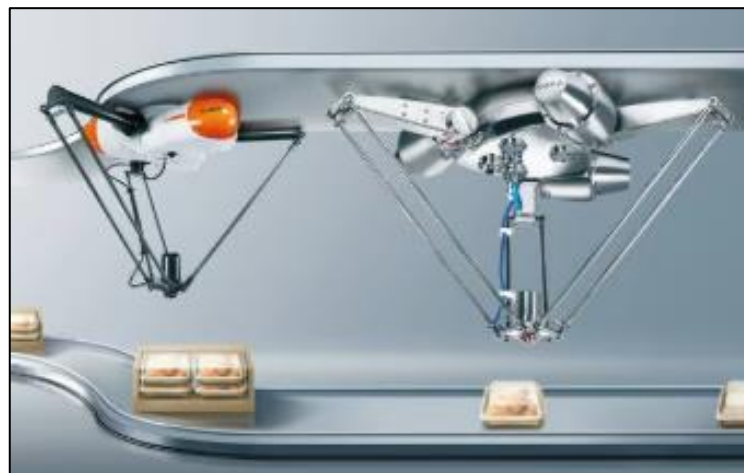


Fonte: Siciliano et al., (2000).

2.4.6 Robô paralelo

O robô paralelo é composto por juntas prismáticas como apresenta a Figura 7, diferente dos outros robôs que tinham em sua composição juntas rotativas, assim apresentando características como alta velocidade de operação e volume de trabalho reduzido. Esse tipo de robô não apresenta cadeia aberta. Todos os atuadores lineares desse robô unem a base ao punho diretamente, a ligação é feita por juntas esféricas (CARRARA, 2015).

Figura 7 – Exemplo de robô paralelo



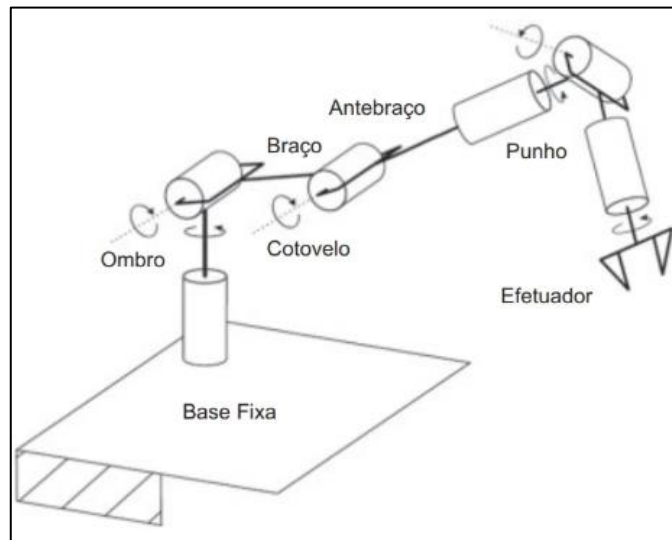
Fonte: Kuka robotics (2025).

2.5 ANATOMIA DE UM ROBÔ

Um manipulador mecânico tem forma similar a um braço humano, composto por braço, antebraço, punho, cotovelo e ombro, e também composto por elos, juntas e efetuador final.

Elos são as partes rígidas, podem ser comparadas ao braço e antebraço humano, juntas são as partes que fazem a conexão móvel entre as partes rígidas, comparados ao ombro e cotovelo, na extremidade oposta a base encontrasse o punho, capaz de aplicar um amplo grau de liberdade e uma ampla flexibilidade de manipulação. A última parte do robô é o efetuador, pode ser uma garra ou outra ferramenta capaz de realizar serviços desejados, a Figura 8 apresenta uma comparação com o braço humano (SANTOS et al., 2015).

Figura 8 – Comparativo conceitual entre braço humano com braço robótico

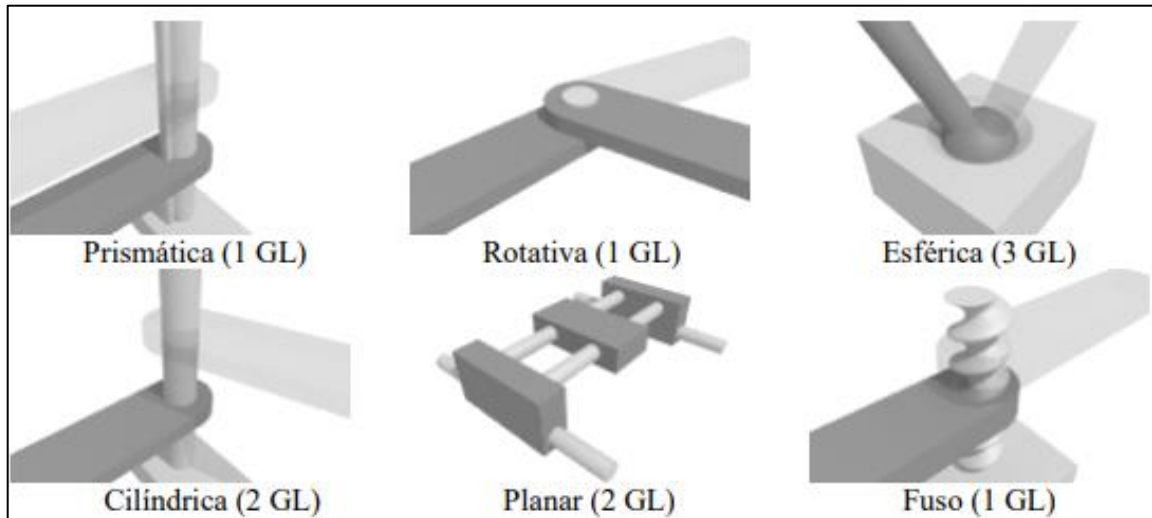


Fonte: Santos et al., (2015).

2.5.1 Juntas

As juntas de um robô, são responsáveis pelo movimento e ligação das partes rígidas, existem basicamente seis tipos de juntas como mostra a Figura 9, as rotativas, prismáticas, cilíndricas, esféricas, de parafusos e as juntas planares, porém, apenas as rotativas e as prismáticas são amplamente usadas em manipuladores (FU et al., 1987).

Figura 9 – Representação dos tipos de juntas

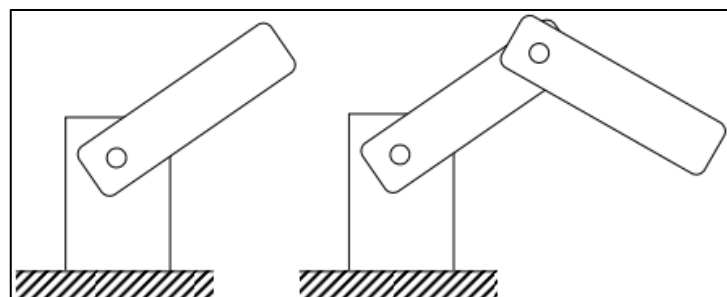


Fonte: Carrara (2015).

2.5.2 Graus de liberdade

Os movimentos do braço robótico são limitados a quantos graus de liberdade (GL) possuem cada junta, seja no espaço bidimensional ou tridimensional. As juntas possuem de um a dois graus de liberdade, somando todos os graus de todas as juntas temos a quantidade total apresentada pelo robô. Juntas com apenas um grau de liberdade é quando seu movimento ocorre somente em torno de um eixo, quando temos movimento em mais que um eixo, a junta apresenta dois graus de liberdade, a Figura 10 apresenta um esquema simples mostrando as diferenças, a esquerda apresenta um grau de liberdade já o da direita apresenta dois (CARRARA, 2015).

Figura 10 – Exemplo de graus de liberdade



Fonte: Carrara (2015).

Quanto maior o número de graus de liberdade de um robô, mais complicado são as questões cinemáticas, dinâmicas e também questão de controle do braço.

Em questão de movimentos, podemos separar movimento do braço com o do punho, os braços geralmente possuem três acionadores em uma configuração chamada 3GL, isso permite

que alcance qualquer ponto dentro de um espaço limitado. Em torno do braço, esses três acionadores permitem três movimentos identificados como:

- Vertical transversal – apresenta o movimento vertical, para cima ou para baixo.
- Rotacional transversal – desenvolve movimento horizontal, para direita ou esquerda.
- Radial transversal – capaz de aproximar ou afastar.

Já o punho é composto por dois ou três GL, as juntas que compõem o punho não têm como objetivo movimentos com deslocamento excessivo, os movimentos realizados pelo punho têm nomes específicos:

- *Roll* ou rolamento – rotação do punho em torno do braço.
- *Pitch* ou arfagem – rotação vertical.
- *Yaw* ou guinada – rotação horizontal.

2.6 APLICAÇÕES DE ROBÔS

Segundo Carrara (2015), todos os dias novas aplicações aparecem para braços robóticos, mas grande parte delas podem ser encaixadas em poucas categorias:

- Manuseio, transporte e operações de carregamento e descarregamento. Essa operação consiste basicamente em movimentar peças entre pontos, tipicamente chamada de pega-e-põe.
- Aplicação de processamento. Nessa aplicação ferramentas adicionais são incorporadas a ponta do punho, para realizar trabalhos de solda, pintura, furação e rosqueamento.
- Montagem e inspeção. Operação focada em montagem mecânica ou elétrica, ou aferição de peças por meio de sensores.

Cada tipo de robô apresentado, possui características únicas devido sua construção mecânica, assim se adaptando melhor em algumas atividades como:

- Robô de revolução (articulado), utilizado amplamente em manuseio e processamento.
- Robô polar (esférico), amplamente utilizado em operações de carga e descarga de máquinas.
- Robô cilíndrico, aplicado principalmente em montagem e inspeção.

- Robô de pórtico, por ter alta capacidade de carga, é usado para montagem de sistemas, empacotamento e armazenamento.
- Robô Scara, indicado a operações de alta precisão, como certas montagens mecânicas ou elétricas.

Os manipuladores também estão sendo utilizados pra operações como, marcação, gravura, colagem, corte, rebarbamento, polimento, entre outras inúmeras aplicações.

2.7 PARÂMETROS PARA DIMENSIONAMENTO DE UMA CÉLULA ROBÓTICA

A integração de uma célula de usinagem para esculturas de pedras automatizada, conta com uma célula robótica e uma estação de usinagem, a estrutura da estação incorpora periféricos como mesa de trabalho rotativa (7° eixo), controlador central, magazine de ferramentas, se necessário e sistema de resfriamento (NGUYEN et al., 2023).

O sistema de resfriamento por água faz parte do conjunto de controle, bombas, tubulações e válvulas. Dada a elevada rotação do *spindle* (fuso), que gera calor durante o corte, acelera o desgaste da ferramenta e compromete a qualidade superficial e dimensional da peça, o resfriamento é um elemento essencial no processo de usinagem (NGUYEN et al., 2023).

No contexto de implementação de células robotizadas, o *layout* é o eixo principal do planejamento, a partir de um estudo detalhado das necessidades, posição da máquina, áreas de circulação, a simulação do ambiente permite definir quadrante de trabalho, zonas de alcance e áreas de segurança, além de verificar interferências entre equipamentos, dispositivos de fixação, periféricos e barreiras. Esse modelo de ambiente orienta a geração de trajetórias compatíveis com o espaço disponível, reduzindo retrabalhos de projeto e riscos de colisão. Com o dimensionamento mecânico em mãos, o método gráfico para modelagem do layout viabiliza a análise de cenários (FREITAS, 2004).

2.7.1 Dimensionamento do robô

Para obtermos o dimensionamento correto de um robô, algumas questões devem ser analisadas, como análise de número de eixos, carga útil e alcance, com isso já se faz um filtro através dos sites dos fabricantes. Após isso, é feita a verificação de carga útil, nessa etapa é realizado o cálculo de massa total, momento de inércia, torque do pulso e centro de gravidade e, com isso, é feita uma busca nos catálogos das montadoras (LEDOUX, 2023).

Segundo Ledoux (2023), o dimensionamento de um robô preferencialmente deve ser superdimensionado pois se for menor ou mais fraco, irá falhar na sua operação, mas superdimensionar drasticamente pode limitar algumas articulações dificultando o espaço disponível, ou seja, a máquina não irá alcançar todos os pontos desejados.

2.7.2 Cálculos

Para obter o dimensionamento do robô alguns cálculos (HALLIDAY et al., 2008) foram utilizados:

$$m_{total} = m_{peça} + m_{ferramenta} + m_{acessorios} \quad (1)$$

Sendo:

$m_{peça}$ = massa total da peça em kg (no caso estudado o robô não tem intuito de manipulação, e sim usinagem, então a massa da peça é desprezado).

$m_{ferramenta}$ = massa da ferramenta em kg, por exemplos, fresas e brocas.

$m_{acessorios}$ = massa de periféricos em kg, como por exemplo, motor que fica preso na ponta do punho.

A taxa de remoção de material determina o volume de rocha desbastado por unidade de tempo, sendo fundamental para o cálculo do consumo de potência. A conversão do avanço para segundos é aplicada na fórmula geométrica padrão (GROOVER, 2017)

$$Q_w = \frac{ap \cdot ae \cdot vf}{60} \quad (2)$$

Sendo:

vf = velocidade de avanço em mm/min.

ap = profundidade de corte axial em mm.

ae = largura de corte radial em mm.

A potência exigida na ferramenta para romper a estrutura do material é o produto da taxa de remoção pela energia específica da rocha (MALKIN et al, 2008).

$$P_c = u \cdot Q_w \quad (3)$$

Sendo:

u = energia específica estimada para o mármore em J/mm^3 .

Para determinar as forças mecânicas a partir da potência, calcula-se previamente a velocidade tangencial na periferia da ferramenta diamantada em metros por segundo (GROOVER, 2017).

$$vc = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot 1000} \quad (4)$$

Sendo:

D = diâmetro da fresa em mm.

n = rotação do eixo-árvore em RPM.

Na usinagem com ferramentas diamantadas, duas forças principais atuam no sistema: a Força Tangencial (F_t), que resiste ao torque da ferramenta, e a Força Normal ou Radial (F_n), que atua perpendicularmente ao eixo da ferramenta, exercendo pressão de esmagamento sobre a rocha (MALKIN et al, 2008).

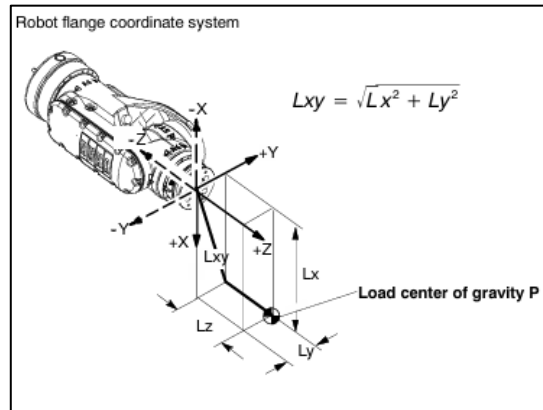
$$F_t = \frac{P_c}{vc} \quad (5)$$

Devido à cinemática de esmagamento imposta pelos grãos de diamante, a literatura técnica aponta que a Força Normal em rochas é substancialmente superior à tangencial, variando empiricamente entre 2 a 5 vezes o valor desta. Adotando-se um fator multiplicador conservador de 3 para o mármore.

$$F_n = 3 \cdot F_t \quad (6)$$

Para calcularmos o centro e gravidade no punho, o próprio catalogo da KUKA dispõe uma fórmula conforme a Figura 11 mostra (KUKA ROBOTICS, 2011).

Figura 11 – Centro de gravidade do punho



Fonte: Kuka robotics (2025).

$$L_{xy} = \sqrt{L_x^2 + L_y^2} \quad (7)$$

Sendo:

L_x e L_y as distâncias do centro de massa em x e y em mm.

2.8 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

O processo para a fabricação de rochas consiste basicamente em duas etapas, a extração e a industrialização feita pelas marmorarias.

2.8.1 Fabricação de chapas de pedra para marmoraria

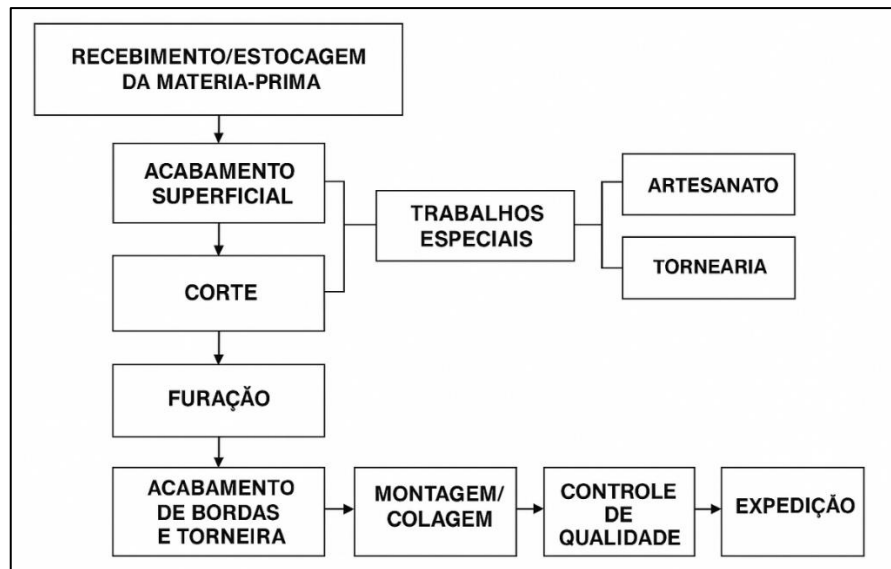
Segundo Chiod Filho (2023), o processo começa com a extração dos blocos, esses possuem volumes de 5 a 12 m³, após extraídos são transportados até indústrias para sofrer o beneficiamento primário, que consiste em ser serrado, para gerar grandes chapas.

2.8.2 Processo de fabricação das marmorarias

Após a etapa de extração das rochas, as mesmas são transportadas dos estoques das pedreiras para as marmorarias, essa etapa apresenta vários nichos de atuação, atualmente as empresas tendem a se especializar no atendimento de produtos específicos para residências, ou trabalhos que requeiram acabamentos e processos mais elaborados. A Figura 12 apresenta um esquema de uma linha de produção de peças produzidas dentro de uma marmoraria, em alguns

casos, dependendo da disponibilidade de maquinário, processos como alguns tipos de corte e furação sofrem mudanças, considerados em outras etapas (VIDAL, 2013).

Figura 12 – Fluxograma de produção



Fonte: Modificado, Vidal (2013).

Atualmente um equipamento que apresenta um grande potencial no setor, são os centros de usinagens, que possibilitam a criação de objetos tridimensionais, podendo criar uma produção em série de acordo com as demandas solicitadas. Isso porque com a automação por comando numérico computadorizado (CNC), possibilita padronização, aumentando a aceitação de peças pelo mercado (CUNHA, 2014).

2.8.3 Utilização do braço robótico na fabricação de peças de mármore

Para a utilização de um equipamento como um braço robótico, alguns processos devem ser seguidos, o primeiro processo deve ser o de desbaste, esse processo consiste em remover a maior parte do material da maneira mais rápida possível. Nessa etapa deve-se utilizar uma fresa grande com um grão mais abrasivo, no segundo processo é feito o acabamento, onde o foco é a qualidade superficial da peça que está sendo usinada, utilizando um grão de fresa mais fino (CHEN et al., 2018).

Nas etapas de desbaste e acabamento, deve-se atentar ao espaçamento deixado entre passadas de fresa, a cada passada um caminho é criado na peça para garantir uma boa qualidade superficial questões como uniformidade, continuidade e bom espaçamento são fundamentais (ZHAO et al., 2018).

O espaço inadequado pode levar a excesso ou falta, no assunto de usinagem a falta se traduz como escamas na superfície não cortadas, causada por espaçamento amplo, e o excesso nesse contexto se refere a sobreposição dos caminhos, assim resulta em cortes excessivos e baixa eficiência de usinagem (ZHAO et al., 2018).

2.9 ROCHAS ORNAMENTAIS

O uso da pedra iniciou no tempo pré-histórico sendo utilizada para confecção de utensílios como armas para caça, guerra, utensílios domésticos e objetos sacros. Por volta de 8000 a.C., seu uso foi encontrado em edificações como elemento construtivo e também como elemento de defesa. Como elemento estético seus primeiros registros são do terceiro milênio antes de Cristo, na região da Mesopotâmia e Egito, aonde era utilizado como forma de perpetuar as figuras dos faraós, Deus e personalidades importantes (ALENCAR, 2013).

Segundo Vidal (2013), o desenvolvimento de técnicas e produtos para rochas ornamentais, ocorreram a partir dos anos 60, mas somente após 1980, essa atividade começou a ter destaque como atividade de mineração. Hoje esse setor vem mostrando cada vez mais espaço nas exportações, responsável por 4% do saldo positivo da balança comercial brasileira em 2012. Aproximadamente 10.000 empresas atuam nessas atividades movimentando mais de quatro bilhões de reais por ano.

2.9.1 Mármore e granitos

Comercialmente as rochas são divididas em, mármore e granitos. Os mármore abrangem as rochas carbonáticas, que são suscetíveis a polimento. Os granitos são designados como rochas silicáticas políveis, predominantemente de origem ígnea. Há outros conjuntos de rochas ornamentais, como litotipos metamórficos, dentro desse conjunto existem os xistos, ardósias e quartzitos, outro conjunto são os das rochas sedimentares diagenizadas, como o arenito e conglomerados, e por último conhecido como matéria prima para esculturas famosas, o grupo dos serpentinitos/esteatitos, também conhecido como pedra sabão (CAVALVANTI, 2017).

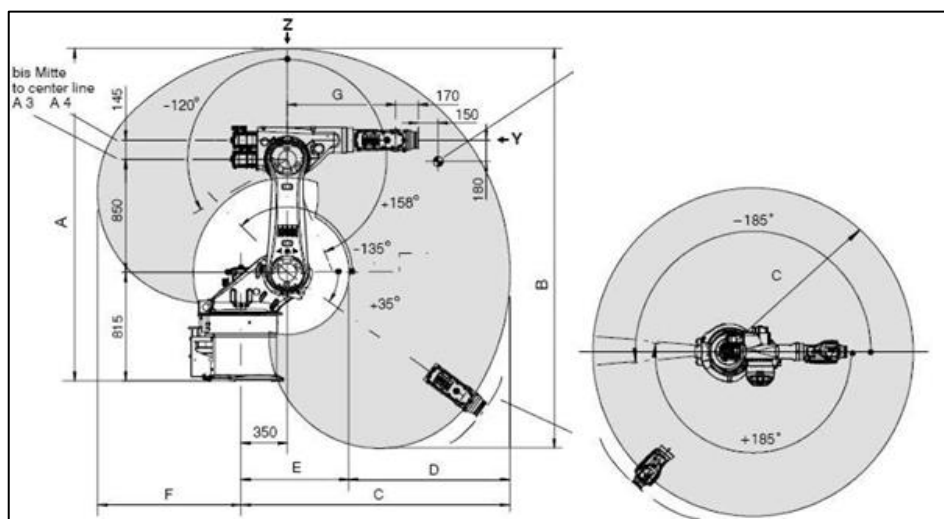
2.10 VOLUME DE TRABALHO

Esse termo, volume de trabalho se refere ao espaço que o braço consegue posicionar seu pulso, esse volume é estabelecido pelos componentes estruturais do robô, ou seja, limite de movimentos das juntas, tamanho dos componentes do corpo. Exemplo disso é o braço esférico, seu volume de trabalho seria o volume da esfera, cujo o raio é o comprimento do braço completamente esticado, porém isso depende também de questões de geometria e dos limites impostos aos movimentos por motivos construtivos e de controle (GROOVER, 1988).

A medida em volume do espaço de trabalho, não é uma maneira efetiva na seleção de um braço para determinada aplicação, mais importante do que saber seu volume é saber se a ferramenta consegue atingir um ponto de tantos milímetros do seu eixo vertical. Por isso, os fabricantes desenvolvem um mapa onde fornece o volume de trabalho em termos de alcance em um ou mais planos (CARRARA, 2015).

A Figura 13 apresenta o volume de trabalho de um robô da fabricante KUKA, onde apresenta dois planos de visualização.

Figura 13 – Volume de um braço articulado KUKA KR30HA



Fonte: Kuka robotics (2018).

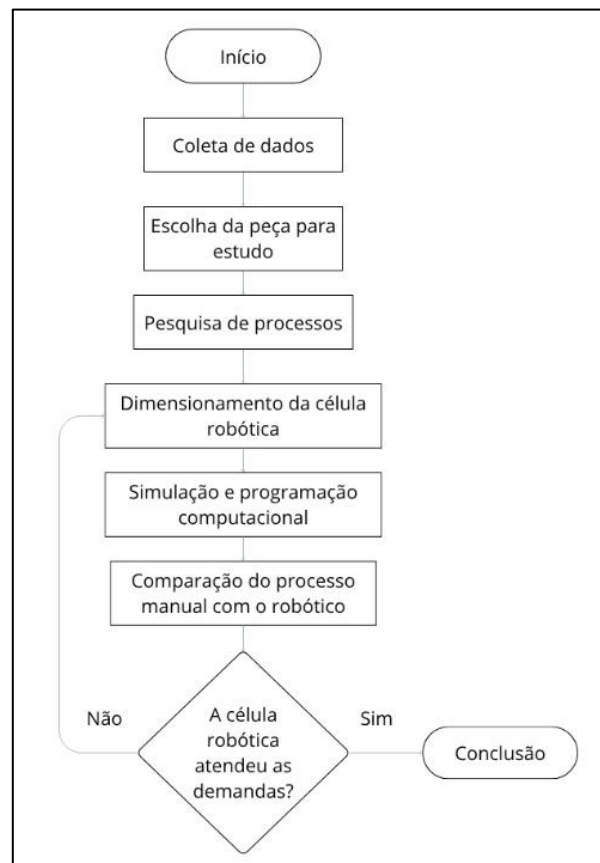
Esse plano apresenta os alcances de trabalho sem a presença do órgão terminal, pois dependendo da aplicação isso pode alterar significativamente tais valores.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta, de forma detalhada, os procedimentos metodológicos e as estratégias adotadas para a realização das análises propostas neste estudo. A estrutura metodológica compreende desde o embasamento teórico sobre robótica industrial até a aplicação prática em uma marmoraria.

As etapas descritas na Figura 14 foram desenvolvidas e analisadas nas dependências da empresa O Caminho das Pedras. Para viabilizar o estudo, realizou-se uma série de coletas de dados e análises técnicas, focadas na integração da célula robótica ao fluxo produtivo da organização.

Figura 14 – Fluxograma



Fonte: Autor (2025).

3.1 COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada na empresa Marmoraria O Caminho das Pedras, onde foi realizado o estudo. Esta etapa teve como foco a identificação das características operacionais do processo de fabricação manual, estabelecendo a linha de base para o estudo comparativo. Os

dados obtidos fundamentaram as simulações computacionais e, posteriormente, validaram a fabricação de uma peça real pela célula robótica.

3.1.1 Tipos de dados coletados

Para a coleta de dados, dois tipos de levantamentos foram feitos, os qualitativos, como, informações do ambiente de trabalho, postura dos funcionários, análise de esforços, riscos ergonômicos e limitações do processo manual, e os dados quantitativos, tempo médio de produção dividido em etapas, dimensões das peças, peso das peças manipuladas, peso das ferramentas, consumo de insumos e produtividade média diária.

Esses dados foram utilizados para confrontar o desempenho manual com o desempenho estimado com a célula robótica.

3.1.2 Métodos para coleta de dados

Na coleta de dados foi considerado o acompanhamento do processo produtivo, nas operações de corte, usinagem e acabamento, cronometragem de processos, para termos tempo médio de processos, registros fotográficos e anotações do ambiente de trabalho, tanto das peças quanto dos operadores, entrevistas com funcionários e supervisor da linha, com o intuito de entender riscos e dificuldades e também as expectativas quanto a automação e consultas internas para firmar valores de tempos de processos e tipos de produtos.

3.2 ESCOLHA DA PEÇA E MATERIAL PARA ESTUDO

A peça-piloto foi definida por critérios de representatividade dos processos, dimensão compatível com a capacidade do robô, necessidade real de acabamento e repetibilidade de demanda.

A peça escolhida foi uma escultura Moai, baseada em uma imagem de referência. Em seguida, um modelo 3D em CAD foi baixado da plataforma *Printables* para realizar a programação no software CAM e gerar o código de usinagem.

O material utilizado foi o mármore Calacatta, esse material apresenta uma dureza Mohs de nível 3 a 4, assim sendo um material relativamente macio, uma rocha composta quase inteiramente por um mineral chamado calcita (carbonato de cálcio). Na mineralogia, a calcita é justamente o mineral de referência absoluto (KLEIN., 2012).

Como mostra a Figura 15 essa peça possui curvas suaves, que exige etapas de desbaste e acabamento e que justifiquem a implementação de um sistema robótico para a sua fabricação.

Figura 15 – Peça piloto



Fonte: Ted's 3D (2025).

3.3 ANÁLISE DO PROCESSO ATUAL

No processo manual foram observados a usinagem e acabamento de peças construídas através de matérias primas como mármore ou granitos, os processos de acabamento foram executados manualmente por operadores experientes, as ferramentas utilizadas foram politriz e retifica pneumática. Já no processo de usinagem, um jato d'água foi utilizado para fazer o trabalho de corte e primeira usinagem.

Na primeira etapa da construção da peça, foi realizado um processo de corte do material sobressalente. Dependendo do formato da peça final, podem ser cortadas diversas fatias de pedra que serão coladas, para dar início no processo de dar formato a matéria ou pode ser iniciada diretamente no processo de usinagem através de fresas dentadas.

Para cada tipo de peça a ser usinada, diâmetros diferentes de fresas foram usadas, nesse processo fatores como rotação da fresa ω (rpm), velocidade de avanço v_a (mm/s) e aumento da profundidade por camada usinada são analisados para cada dureza de material.

Após a peça já ter passado pela usinagem, ela ganhou forma, porém a cada passada de fresa se cria uma linha de camada. Para remover essas linhas utiliza-se a politriz pneumática,

onde é realizada uma raspagem na peça com uma fresa diamantada, para a peça ficar com uma superfície homogênea e passar para o setor de acabamento.

Essas operações manuais demandam esforço físico contínuo, exposição a ruído elevado, vibrações e ambiente úmido, pois nos processos apresentados a utilização da água é indispensável para a refrigeração e remoção de resíduos das ferramentas diamantadas.

Durante as coletas de dados, foram registradas informações como tempo de ciclo de produção, frequência de pausas, números de operadores envolvidos e condições ergonômicas de trabalho.

3.4 PESQUISA DE PROCESSOS

A pesquisa de processos teve por objetivo apresentar métodos e parâmetros de usinagem e acabamento em rochas ornamentais, esses que fizeram parte de um conjunto de decisões operacionais para ser aplicados ao robô. Em vez de levantar parâmetros abstratos, um conjunto de dados coerentes ao nicho de produção de marmoraria foi construído, respeitando as limitações físicas dos materiais e capacidade dos atuadores.

Para tomar base dos parâmetros usados, catálogos e fornecedores de ferramentas foram consultados, para obtermos dados como rotação e avanço, profundidade de corte, necessidade do uso de água para resfriamento das ferramentas diamantadas e estratégia de trajetória, esses dados foram organizados de forma que possamos utilizar de uma matriz de decisão entre, parâmetros, processos e resultado esperado.

Para a fabricação da peça piloto, a usinagem exige uma remoção volumétrica de material. Essa remoção foi dividida em 3 etapas de desbaste, onde foi retirado o maior volume de material, primeira etapa de acabamento, responsável pela redução das cristas deixadas no desbaste e acabamento final, nessa etapa se localiza o processo mais detalhista, nele foi feito o acabamento superficial, finalizando o processo de fabricação da peça.

3.5 PARAMETRIZAÇÃO DA CÉLULA ROBÓTICA

Para auxiliar na escolha da máquina o site *UnionRobot*, apresentou um guia como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Modelos de robôs KUKA e suas aplicações

KR CYBERTECH	KR IONTEC	KR PA	KR QUANTEC	KR FORTEC	KR 1000 TITAN
Capacidade de carga: 6-22 kg	Capacidade de carga: 20-70 kg	Capacidade de carga: 40-700 kg	Carga útil: 120-300 kg	Carga útil: 340-800 kg	Capacidade de carga: 750-1300 kg
Alcance máximo: 1420-2013 mm	Alcance máximo: 1573-2100 mm	Alcance máximo: 2091-3320 mm	Alcance máximo: 2671-3904 mm	Alcance máximo: 2485-3700 mm	Alcance máximo: 3202-3601 mm
Manuseio, Aplicação/Pintura/ Colagem, Carregamento/ Descarregamento de Máquinas, Paletização/Embalagem, Pick & Place, Montagem, Usinagem Mecânica e Polimento, Soldagem a Arco, Medição/Inspeção, Corte/Separação	Usinagem mecânica e polimento; Montagem; Aplicação/Pintura/ Colagem; Soldagem e corte a laser; Medição/Inspeção; Manuseio; Corte/Separação; Paletização/ Embalagem; Soldagem por pontos; Fundição/Requisitos de proteção reforçada.	Manuseio, paletização/ embalagem	Usinagem mecânica e polimento; Montagem; Aplicação/Pintura/ Colagem; Soldagem e corte a laser; Medição/Inspeção; Manuseio; Corte/Separação; Paletização/ Embalagem; Soldagem por pontos; Fundição/ Requisitos de proteção reforçada.	Usinagem mecânica e polimento; Montagem; Aplicação/Pintura/ Colagem; Soldagem e corte a laser; Medição/Inspeção; Manuseio; Corte/Separação; Paletização/Embalagem; Soldagem por pontos; Fundição/Requisitos de proteção reforçada.	Manuseio, paletização/ embalagem, fundição/requisitos de proteção reforçados, usinagem mecânica e polimento, montagem, soldagem por pontos, medição/inspeção, corte/separação, aplicação/pintura/ colagem

Fonte: Modificado UnionRobot (2023).

Para a seleção do robô, foi feita uma escolha dentre os modelos da marca KUKA, pois a empresa onde foi realizado o estudo conta com uma parceria com uma revendedora da marca.

3.6 SIMULAÇÃO E PROGRAMAÇÃO

O desenvolvimento da manufatura automatizada iniciou-se com o modelamento tridimensional da peça em software CAD. Na sequência, o processo de fabricação foi simulado em software CAM, responsável pela geração dos códigos de controle numérico. Contudo, a coordenação de movimentos simultâneos em múltiplos eixos, somada à elevada complexidade dos centros CNC e das próprias operações de usinagem, torna insuficiente o emprego isolado dessas técnicas quando se busca extrair a máxima eficiência do equipamento (PETRU et al., 2025).

Entre as soluções contemporâneas, destaca-se o uso de gêmeos digitais de máquinas CNC, réplicas virtuais que reproduzem fielmente o comportamento dos sistemas reais. Esses modelos permitiram entre outras vantagens, conduzir estudos de simulação mais fidedignos dos processos envolvidos, viabilizando análises e otimizações em ambiente virtual antes da execução no chão de fábrica (PETRU et al., 2025).

Obtivemos a simulação computacional e a programação através do código *G-code*, pelo software *Ency*®, a escolha desse programa foi feita pela empresa COMAC que efetuou a venda do robô para a marmoraria.

Através do *Ency*® foi feita a criação do gêmeo digital do robô com todos os seus periféricos ao redor, para assim ser executada todas as simulações, evitando colisões e choques de ferramentas contra a peça.

3.7 COMPARAÇÃO ENTRE PROCESSO MANUAL E ROBÓTICO

O experimento teve como objetivo comparar os métodos manual e robótico quanto à produtividade e custo direto por peça. A amostragem compreendeu uma peça por método, totalizando duas unidades provenientes do mesmo lote de matéria-prima, sendo a unidade experimental uma peça-piloto de 270x160x260mm. Foi mantido a sequência abrasiva, vazão de água, o sistema de fixação, os instrumentos calibrados e as condições ambientais.

Obtivemos uma comparação entre processos, métodos como a análise visual da superfície da peça foi feito, após isso foi conferido o dimensionamento de algumas partes das peças, para assim termos dados sobre as peças. Tendo essas 2 amostragens feitas, foi analisado o tempo de produção e quantos processos foram precisos para obtermos o produto final.

4 RESULTADOS

Para obtermos os resultados, iniciamos pela coleta de dados onde se teve uma breve apresentação do processo como um todo, tendo em vista desde maquinário utilizado e também mão de obra.

A Figura 16 mostra um funcionário fazendo o uso de uma das ferramentas mais convencionais, a serra mármore pneumática, utilizada para a etapa de acabamento refrigerado a água.

Figura 16 – Funcionário utilizando a serra mármore



Fonte: Autor (2026).

As ferramentas por si só, não causam desgaste nas peças, para isso é feito o uso de insumos como mostra a Figura 17, como exemplos, lixas e discos diamantados, fresas, rebolos, brocas, ponteiros para retifica.

Figura 17 – Instrumentos de desgaste



Fonte: Autor (2026).

Máquinas elétricas também são utilizadas, mas somente no processo final aonde é realizado a seco, com o objetivo de realizar a última inspeção na peça e corrigir algum ponto que não atende as especificações da peça.

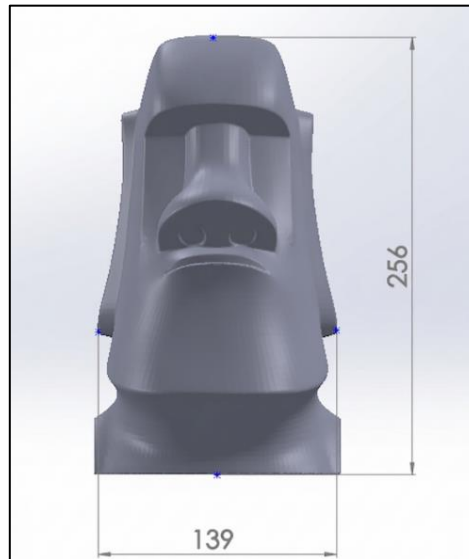
O trabalho de lixar e polir esculturas em marmorarias exige um esforço físico contínuo, cobrando um alto preço do corpo dos artesãos. Do ponto de vista da ergonomia, a atividade frequentemente obriga o trabalhador a adotar posturas inadequadas e desconfortáveis por longos períodos para conseguir acompanhar os contornos curvos e complexos da pedra.

Essa exigência física, aliada à vibração constante das ferramentas e aos movimentos repetitivos, impõe severas limitações humanas. O resultado direto é a fadiga muscular, o desgaste das articulações e um risco elevado de lesões por esforço repetitivo o que reduz drasticamente a resistência do profissional e o tempo contínuo que ele consegue dedicar à tarefa com segurança.

Além do profundo desgaste físico, essas questões já citadas se traduzem em limitações de qualidade no acabamento da peça. Por mais habilidoso que seja o funcionário, a exaustão progressiva dificulta a fabricação de uma pressão uniforme e de um ritmo constante no lixamento, o que pode gerar inconsistências na superfície do mármore. Somado a isso, o próprio alcance das mãos e o tamanho das lixadeiras manuais esbarram em limites técnicos, é extremamente difícil alcançar, vincos ou detalhes minuciosos da escultura com a precisão ideal. Nesses detalhes críticos, o esforço manual atinge o seu limite, criando um cenário onde a busca pela perfeição estética milimétrica entra em conflito direto com as capacidades e a saúde do trabalhador.

Para isso a fabricação de uma peça é necessária para podermos analisar ambos processos e suas limitações. A Figura 18 apresenta a peça selecionada já modelada através do *software SolidWorks®*.

Figura 18 – Escultura utilizada no estudo

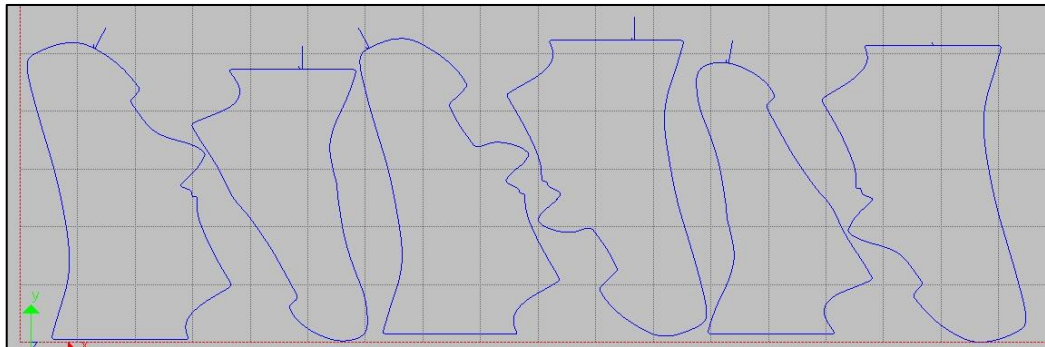


Fonte: Autor (2026).

4.1 FABRICAÇÃO ATUAL

Para produzir as peças da forma atual, não robótica, algumas etapas foram respeitadas para se obter a peça, foi realizado o fatiamento da peça em software conforme a Figura 19.

Figura 19 – Desenvolvimento das peças para corte



Fonte: Autor (2026).

Com isso foi cortado no jato d'água as peças, as pedras por padrão de uso são de 20 mm, então o fatiamento foi feito respeitando essa espessura. Após o corte, a peça foi para o setor de colagem, aonde foi juntada fatia por fatia em ordem para se obter o primeiro formato da peça.

A junção é feita através de massa plástica, tingida na cor da matéria prima, a Figura 20 apresenta esse processo.

Figura 20 – Colagem do bloco para usinagem manual



Fonte: Autor (2026).

Com a peça colada, o processo de usinagem manual começa. Na primeira etapa é utilizada a serra mármore pneumática com disco diamantado e com retífica pneumática com fresas diamantadas, a Figura 21 apresenta as ferramentas utilizadas.

Figura 21 – Início da usinagem



Fonte: Autor (2026).

Com a peça usinada, o próximo processo é o de acabamento, para obter uma textura lisa. Nessa etapa serão utilizadas lixas diamantadas grão 50, 100, 200 e 400, conforme apresenta a Figura 22, o processo de fabricação e as ferramentas utilizadas.

Figura 22 – Processo de acabamento



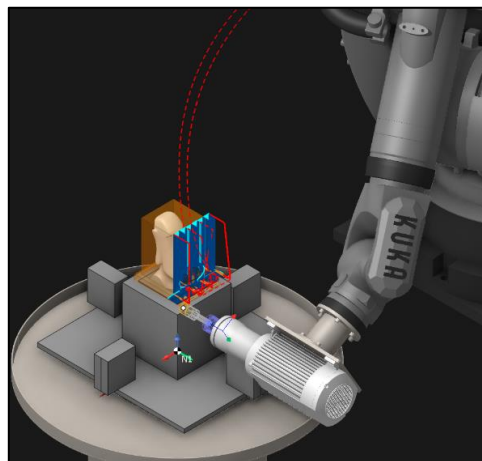
Fonte: Autor (2026).

4.2 PROGRAMAÇÃO E SIMULAÇÃO ROBÓTICA

Foi realizada uma programação via *software*, um código com linguagem computacional é gerado para que seja lido pela máquina e executada.

As primeiras etapas foram feitas com um mecanismo de desbaste chamado desbaste linha da água, nesse desbaste o robô remove a maior parte do material do bloco. Nesse modelo de usinagem o robô trabalha somente em um sentido, sem fazer mergulhos em ângulos dentro da peça, conforme mostra a Figura 23.

Figura 23 – Desbaste linha da água



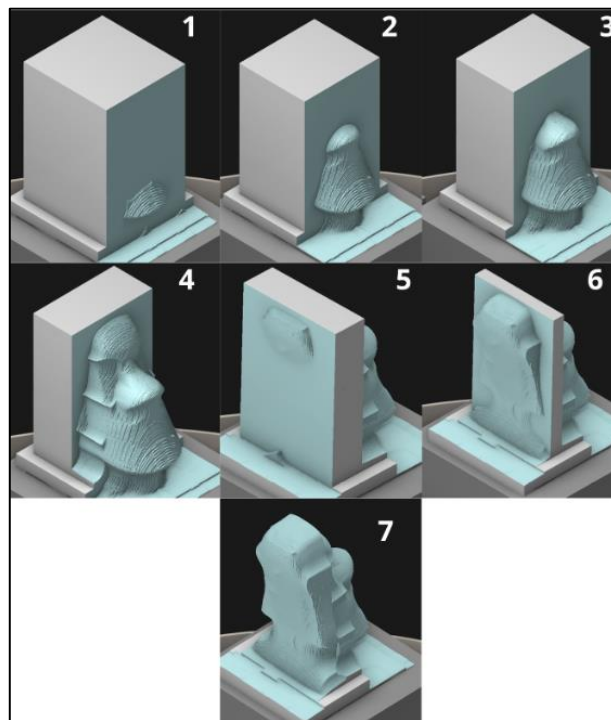
Fonte: Autor (2026).

Através do processo citado, obtivemos sete etapas primárias, aonde foi utilizado uma fresa de desbaste nomeada como fresa topo D40X28X8. Essa etapa foi dividida em 7 fases, pois como estamos lidando com um material frágil e com alto poder de desgastar o componente abrasivo da ferramenta.

Em cada etapa foi ajustado o tamanho da ferramenta com seu desbaste apresentado, para termos maior precisão na usinagem e também pelo fato de por alguma falha do material abrir um veio, fazendo a peça se dividir ou mudar sua forma, podendo ocasionar alguma colisão não desejada.

Na Figura 24 é possível identificar, por ordem, cada etapa de desbaste.

Figura 24 – Etapas de desbastes



Fonte: Autor (2026)

Para a alimentação de parâmetros de usinagem no programa utilizamos os valores apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de usinagem

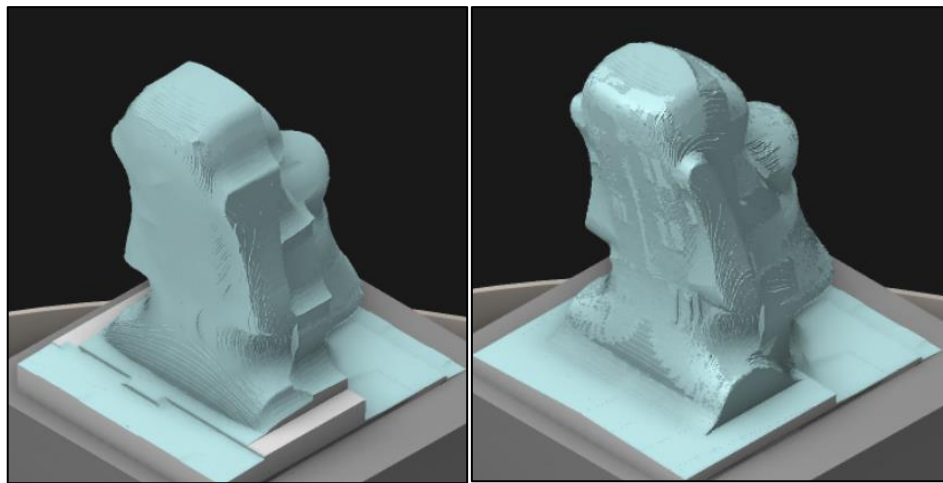
Nº de operação	Ferramenta	Diâmetro da ferramenta (mm)	Rotação da ferramenta (rpm)	Velocidade de corte (mm/min)	Profundidade de corte (mm)
1	FRESA TOPO D40X28X8D	40.5	3400	600	0,5
2-3-4-5-6-7	FRESA TOPO D40X28X8D	40.5	3400	1200	0,5

Fonte: Autor (2026).

Para os sete processos que foram realizados, a estratégia de usinagem foi igual para todos, sentido de usinagem paralelo, com passo de 30mm.

Após ter passado pela usinagem já apresentada, foi acrescentado mais um processo de desbaste, porém esse com foco em acabamento da peça, utilizando a mesma fresa dos passos anteriores. Na Figura 25, podemos observar a mudança da superfície do material em um mesmo ponto de vista do objeto, tendo a imagem da esquerda a peça na etapa sete e na direita a peça na etapa nove, que também representa a usinagem da etapa oito só mudando o lado.

Figura 25 – Desbaste final da fresa D40X28X8.



Fonte: Autor (2026).

Para finalizar a peça mais dois processos foram adicionados, agora com ênfase em acabamento, para isso a fresa utilizada é diferente das dos processos anteriores. Agora utilizaremos uma fresa esférica eletrolítica D21X28X1D, conforme conseguimos observar na Figura 26, que também demonstra as diferenças entre elas.

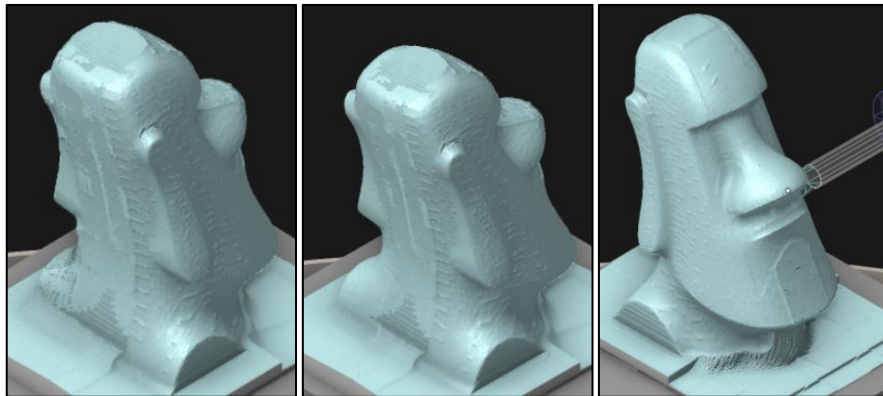
Figura 26 – Comparação entre fresas, D40X28X8 e D21X28X1D



Fonte: Autor (2026).

Com a fresa de acabamento foram feitas as etapas 10,11 e 12, aonde utilizamos ainda o processo de desbaste linha da água para obtermos uma peça mais lisa. Nesse processo foram mesclados os movimentos do robô para obtermos acabamentos mais perfeitos, utilizamos todos os recursos do robô como, mesa giratória e desbastes angulados, para que a fresa conseguisse acessar melhor todos os pontos do objeto. Com isso conseguimos obter uma superfície sem cristas, conforme apresentado na Figura 27.

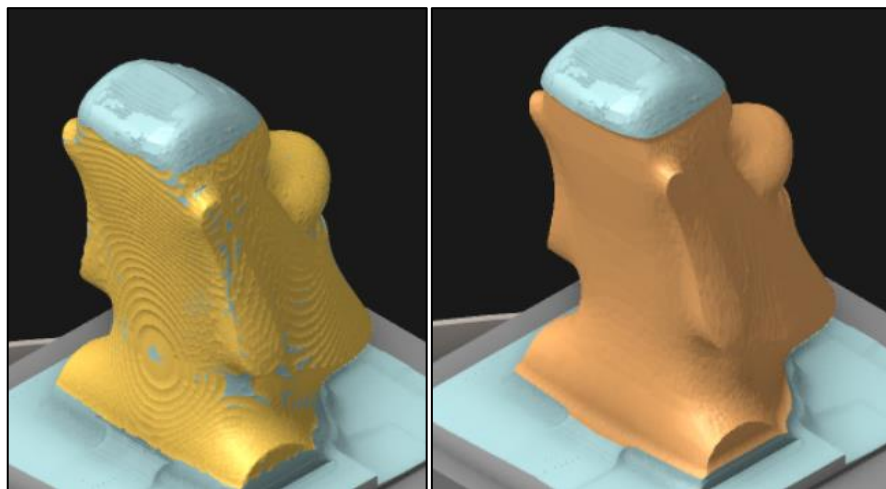
Figura 27 – Desbastes 10, 11 e 12



Fonte: Autor (2026).

Feito isso, duas etapas de beneficiamento rotativos foram adicionadas, o desbaste rotativo e a usinagem rotativa, para com eles ser atingidos uma superfície totalmente acabada, conforme apresenta a Figuras 28.

Figura 28 – Desbaste rotativo e usinagem rotativa



Fonte: Autor (2026).

O processo de desbaste rotativo foi realizado com o objetivo de preparar a peça para receber a usinagem rotativa, onde a mesa giratória movimenta a peça e o braço robótico só

alterna a altura da usinagem, finalizando assim a peça. Porém foi notado que poderíamos melhorar a usinagem na parte superior da peça, então foi adicionado mais um desbaste nela para termos uma peça com alto padrão de acabamento final.

Com a peça finalizada, foi contabilizado o restante dos dados de usinagem da etapa oito até a de acabamento superior final, com tempos e detalhes na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros da última etapa de usinagem robótica

Operação	Ferramenta	Diâmetro da fresa (mm)	Rot. fresa (rpm)	Vel. corte (mm/min)	Passo de usi. (mm)	Profundidade de corte (mm)
8-9	FRESA TOPO D40X28X8D	40.5	3400	1200	30	0,5
10	FRESA ESFERICA ACAB D21X28X1D	20.5	3400	1200	5	0,5
11	FRESA ESFERICA ACAB D21X28X1D	20.5	3400	1500	3	0,5
12	FRESA ESFERICA ACAB D21X28X1D	20.5	3400	1500	3	0,5
Desbaste rotativo	FRESA ESFERICA ACAB D21X28X1D	20.5	3400	1500	4	1,5
Usinagem rotativa	FRESA ESFERICA ACAB D21X28X1D	20.5	3400	1500	1	0,5
Acabamento superior final	FRESA ESFERICA ACAB D21X28X1D	20.5	3400	1000	3	0,5

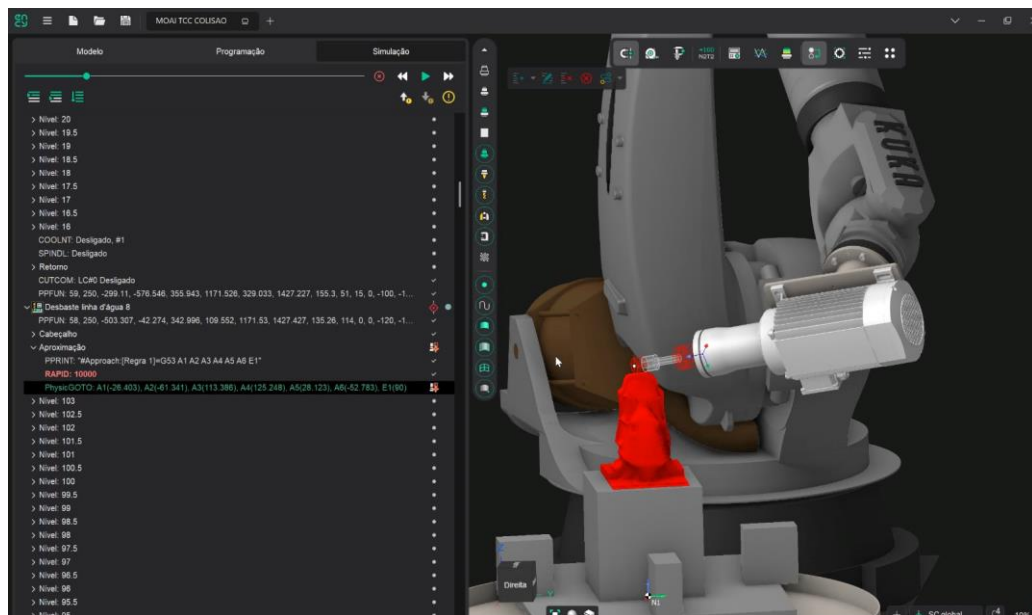
Fonte: Autor (2026).

4.2.1 Mapeamento de simulação de movimentos

Para dar início ao processo de usinagem, uma simulação de movimentos e trajetórias do robô foi realizada para analisar se alguma invasão ou impacto indesejado possa acontecer, possibilitando que a máquina opere mesmo sem um operador presente.

O programa utilizado possui a virtualização da máquina, esquema tridimensional das ferramentas, gabaritos e sistema de fixação da peça, gera um caminho para que não ocorra impactos. Mas se mesmo assim ocorrer, a programação ou o mapeamento dos eixos devem ser alterados para atingir uma movimentação segura de usinagem, como visto na Figura 29, um impacto foi sinalizado.

Figura 29 – Demonstração de impacto



Fonte: Autor (2026).

Por exemplo, na Figura 29 um impacto foi acusado, esse impacto é gerado no início da usinagem enquanto o robô se aproxima da peça para a usinagem, para resolver tal situação devemos alterar alguns parâmetros como aproximações e retorno, alterando o padrão de máquina para a opção de evitar colisões, liberando uma opção que podemos aumentar essa distância para não haver impacto da ferramenta na peça em movimentações, não só em momentos de usinagem, mas em momentos de movimentação do próprio robô.

Outro mecanismo que a virtualização nos permitiu utilizar foi o mapeamento de eixos, com isso movimentos que exigem níveis de esforços sem necessidade e movimentos que podem

gerar impacto e torção do sistema elétrico podem ser evitados e corrigidos antes do processo se iniciar, tendo uma usinagem segura.

4.3 FABRICAÇÃO DA PEÇA POR USINAGEM ROBOTICA

Para a fabricação da peça pelo método da usinagem robótica, o primeiro passo é semelhante ao da peça que é fabricado pelo processo manual, o bloco que foi usinado partiu de várias lâminas de chapas cortadas de dimensões específicas para atender o projeto, conforme mostra a Figura 30, onde são vistas as emendas entre peças e as medidas do bloco criado.

Figura 30 – Colagem do bloco para usinagem robótica



Fonte: Autor (2026).

Após o bloco ser construído ele deve ser fixado na mesa giratória do robô, aonde uma base de elevação foi construída para evitar possíveis atritos entre motor fixado no punho do robô, com a bandeja coletora de água, a Figura 31 apresenta essa etapa do processo.

Figura 31 – Fixação do bloco na mesa giratória



Fonte: Autor (2026).

Com a peça fixada através de calços e cola em sua base de elevação, na primeira etapa da usinagem, é feito o desbaste mais grosseiro da peça, utilizando a ferramenta D40X28X8 vista na Figura 32.

Figura 32 – Desbaste primário



Fonte: Autor (2026).

Após essa etapa a peça ficou com o formato já previamente definido, porém ainda com acabamento bruto, conforme a Figura 33 mostra.

Figura 33 – Peça com usinagem primaria



Fonte: Autor (2026).

Por essa ferramenta ter sua granulometria mais abrasiva, ela é designada para o primeiro desbaste aonde a maior parte do material vai ser retirado. Sobrando assim, para a segunda etapa, o desbaste aonde a peça ganhou sua forma final, para essa etapa foi utilizado a ferramenta apresentada na Figura 34.

Figura 34 – Usinagem secundária



Fonte: Autor (2026).

Essa ferramenta é uma fresa eletrolítica, com o objetivo de finalizar a peça. Por ter sua capacidade de abrasão menor que a primeira apresentada, ela realizou a última parte da usinagem, aonde a peça é refinada e praticamente pronta. Na Tabela 4 todos os desgastes das ferramentas utilizadas foram contabilizados durante o processo.

Tabela 4 – Desgaste das ferramentas

Nº da operação	Comprimento da ferramenta (mm)	Desgaste (mm)
1	200	0
2	199.3	0.7
3	198	1.3
4	197.8	0.2
5	197.1	0.7
6	196.7	0.4
7	196	0.7
8	195.8	0.2
9	195.7	0.1
10	201.8	0
11	201.4	0.4
12	201.4	0
Desbaste rotativo	201.4	0
Usinagem rotativa	201.3	0.1
Acabamento superior final	201	0.3

Fonte: Autor (2026).

Após todas etapas concluídas foi feito somente um leve lixamento para corrigir algumas linhas deixadas pelas passadas da fresa de acabamento, conforme apresenta a Figura 35.

Figura 35 – Acabamento fino



Fonte: Autor (2026).

4.4 CARACTERIZAÇÃO DA CÉLULA ROBÓTICA INTEGRADA

Com base no projeto conceitual e no dimensionamento realizado, a célula robótica foi consolidada utilizando o robô articulado KUKA KR240-2 US. A escolha deste modelo justificou-se pela sua precisão e volume de trabalho, essenciais para a usinagem de rochas ornamentais de geometrias complexas.

Para o dimensionamento da célula robótica de usinagem, faz-se necessário o cálculo das forças atuantes durante o processo de fresamento. Diferentemente da usinagem de metais dúcteis, regida classicamente pela equação de Kienzle, a usinagem de rochas ornamentais como o mármore ocorre por mecanismos de fratura frágil, esmagamento e abrasão através da utilização de ferramentas diamantadas (MALKIN et al, 2008).

Dessa forma, a metodologia adotada para o cálculo das forças baseia-se na teoria da energia específica de usinagem por abrasão. Os parâmetros operacionais definidos para o fresamento em estudo estão descritos abaixo:

Diâmetro da fresa (D): 40 mm

Rotação do eixo-árvore (n): 3400 RPM

Velocidade de avanço (vf): 1200 mm/min

Profundidade de corte axial (a_p): 0,5 mm

Largura de corte radial (a_e): 30 mm

4.4.1 Cálculo da Taxa de Remoção de Material

A taxa de remoção de material determina o volume de rocha desbastado por unidade de tempo, sendo fundamental para o cálculo do consumo de potência.

Substituindo os valores definidos:

$$Q_w = \frac{a_p \cdot a_e \cdot v_f}{60} = \frac{0,5 \cdot 30 \cdot 1200}{60} = 300 \text{ mm}^3/\text{s}$$

4.4.2 Cálculo da Potência de Corte

A potência exigida na ferramenta para romper a estrutura do material é o produto da taxa de remoção pela energia específica da rocha (u).

$$P_c = u \cdot Q_w = 2 \cdot 300 = 600W$$

A determinação do coeficiente de energia específica de corte (u), conforme os ensaios práticos documentados (PRAJWAL et al, 2016), no fresamento CNC de amostras de mármore natural, o consumo específico de energia oscila de forma dinâmica em função das condições operacionais adotadas. Diante destas evidências empíricas e com o intuito de aplicar um rigoroso valor de segurança que contemple tanto a variabilidade natural da rocha quanto as condições mais críticas do desbaste, adotou-se o valor conservador de 2,0 J/mm³ para o cálculo e o dimensionamento dos esforços submetidos ao manipulador robótico.

4.4.3 Velocidade Periférica de Corte

Para determinar as forças mecânicas a partir da potência, calcula-se previamente a velocidade tangencial na periferia da ferramenta diamantada em metros por segundo (m/s):

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60 \cdot 1000} = \frac{\pi \cdot 40 \cdot 3400}{60 \cdot 1000} = 7,12 \text{ m/s}$$

4.4.4 Determinação das Forças de Usinagem

Na usinagem com ferramentas diamantadas, duas forças principais atuam no sistema, a força tangencial, que resiste ao torque da ferramenta, e a força normal ou radial, que atua perpendicularmente ao eixo da ferramenta, exercendo pressão de esmagamento sobre a rocha.

A força tangencial é calculada pela relação entre a potência e a velocidade de corte:

$$F_t = \frac{P_c}{v_c} = \frac{600}{7,12} = 84,3 \text{ N ou } 8,43 \text{ kgf}$$

Devido à cinemática de esmagamento imposta pelos grãos de diamante, a literatura técnica aponta que a força normal em rochas é substancialmente superior à tangencial, variando empiricamente entre 2 a 5 vezes o valor desta. Adotando-se um fator multiplicador conservador de 3 para o mármore:

$$F_n = 3 \cdot F_t = 3 \cdot 84,3 = 252,8 \text{ N ou } 25,3 \text{ kgf}$$

4.4.5 Análise de Carga para o Robô KUKA KR 240-2

Os esforços de usinagem calculados atuarão diretamente sobre a ferramenta e, conseqüentemente, sobre o punho do braço robótico KUKA KR 240-2.

Para validar a viabilidade do uso do robô, estima-se a carga total efetiva imposta à flange terminal:

Peso estimado do *Spindle*: 45 kg

Peso do ferramental e suporte: 20 kg

Força de repulsão dinâmica gerada pela usinagem: 25,3 kgf

$$m_{total} = m_{peça} + m_{ferramenta} + m_{acessorios}$$

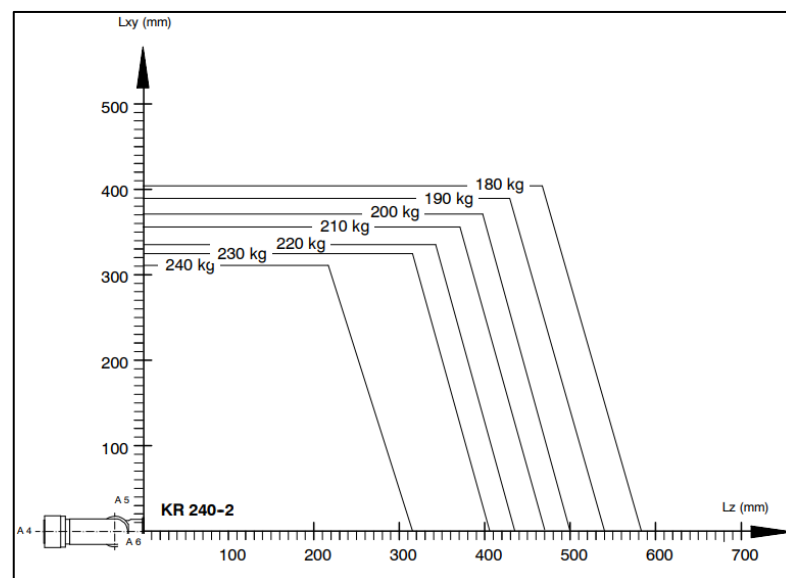
$$m_{total} = 45 + 20 + 25,3 = 90,3 \text{ kg}$$

A somatória das massas indica uma carga solicitante inferior a 100 kg. Este valor representa aproximadamente 38% da capacidade nominal do manipulador (240 kg). Conclui-se, portanto, que o robô selecionado apresenta rigidez mecânica e torque nos redutores de suas juntas amplamente superdimensionados para a tarefa, garantindo a absorção das forças dinâmicas de 252,8 N sem a ocorrência de vibrações prejudiciais ou sobrecarga.

4.4.6 Análise de esforço no punho

Segundo a fabricante, um cálculo de distribuição de massa deve ser feito para o punho do robô, então tendo como dado de massa total de 90,3kg, foi analisado a Figura 36. Este gráfico serve para garantir que a ferramenta ou a peça que o robô vai manipular não ultrapasse o limite de força suportado pelas juntas do braço robótico. Mesmo que o robô suporte, por exemplo, 240 kg, se o peso estiver muito na ponta ou muito deslocado para o lado, ele fará uma alavanca que pode danificar o equipamento.

Figura 36 – Capacidade de carga do punho em função do deslocamento do centro de gravidade



Fonte: Kuka robotics (2011).

No cenário analisado neste projeto, a geometria da ferramenta acoplada e o arranjo físico da peça foram projetados de forma concêntrica ao centro geométrico do flange de fixação. Portanto, os desvios laterais e verticais foram zerados ($L_x = 0\text{mm}$ e $L_y = 0\text{mm}$), resultando em um $L_{xy} = 0\text{mm}$. A massa total do conjunto totalizou 90,3 kg, posicionada a uma distância linear frontal L_z de 230 mm a partir do ponto de referência do punho.

Ao projetar as coordenadas operacionais ($L_z = 230\text{mm}$; $L_{xy} = 0\text{mm}$) sobre o diagrama de carga nominal do modelo KR 240-2 fornecido pelo fabricante, o ponto de interseção localiza-se na região mais interna e inferior do envelope de operação segura.

O gráfico original delimita curvas escalonadas de carga que variam de 180 kg até a capacidade máxima nominal de 240 kg. Para uma distância L_z de 230 mm com excentricidade

nula ($L_{xy} = 0\text{mm}$), o manipulador robótico estaria apto a suportar a carga máxima de 240 kg com total segurança.

4.5 ANÁLISE COMPARATIVA: PROCESSO MANUAL VS. ROBÓTICO

Para realizarmos as comparações, algumas estratégias foram utilizadas, como análise visual das peças, análise de dimensionamento e tempo de produção de cada etapa.

4.5.1 Tempo de produção

Ao analisarmos o tempo de produção, observamos que o processo manual e o processo robótico apresentaram desempenhos praticamente idênticos. No entanto, a verdadeira vantagem competitiva da automação evidencia-se na redução drástica do *lead Time* da operação.

A produção manual está sujeita a variáveis que influenciam diretamente no tempo de produção, como pausas, trocas de turno, troca de ferramentas, fadiga ergonômica e paradas não programadas a Tabela 5 apresenta os tempos da produção manual.

Tabela 5 – Tempo para produção manual.

Processo	Tempo
Corte	1:40:40
Colagem	2:00:00
Cura	5:00:00
Usinagem	10:30:00
Lixamento	6:30:00
Retoques	2:15:00

Fonte: Autor (2026).

O total de tempo para o processo manual ficou em 27:55:40, com todo o processo contabilizado, assim obtendo uma peça pronta. O *lead time* desse método ficou em 5 dias úteis.

O processo robótico garante um fluxo contínuo e previsível, o robô opera com o tempo inteiramente sob disponibilidade, eliminando tempos de pausas quando comparado ao processo manual, mantendo um ritmo exato do primeiro ao último minuto do dia. Como resultado, mesmo que a velocidade por peça seja a mesma, como mostra a Tabela 6, o robô finaliza ordens

de produção inteiras de forma muito mais rápida, garantindo entregas ágeis e uma resposta mais eficiente à demanda do cliente.

Tabela 6 – Tempo para produção robótica

Processo	Etapa	Tempo
Colagem	Fixação bloco	0:40:00
Usinagem	1	2:13:40
	2	1:47:46
	3	1:01:19
	4	1:40:25
	5	1:48:36
	6	1:35:16
	7	1:34:00
	8	1:33:43
	9	1:31:48
Acabamento	10	1:19:06
	11	1:09:58
	12	0:34:03
	13	1:39:21
	14	5:26:43
	15	0:43:09

Fonte: Autor (2026).

No tempo total de produção da peça robótica, temos o tempo total de máquina 26:18:53, porém precisamos levar em conta um acréscimo de 15 minutos no tempo total, para alguns retoques que podem acontecer uma vez que estávamos trabalhando com uma matéria prima natural. O *lead time* desse processo foi de 2,5 dias úteis.

4.5.2 Análise visual

A análise visual avaliou as características da superfície de duas amostras produzidas a partir do mesmo modelo de referência, comparando os resultados do método de usinagem robótica com o manual.

A amostra executada pelo sistema robótico por sua precisão geométrica teve uma uniformidade perfeita, o acabamento de superfície apresentou uma textura consistentemente lisa, sem variações na profundidade ou alterações de rugosidade. Suas linhas e arestas são definidas com exatidão, garantido uma peça com alto padrão de usinagem, padronização e previsibilidade como é possível visualizar na Figura 37 que apresenta uma vista frontal da peça aonde podemos ver a perfeição em detalhes da usinagem.

Figura 37 – Vista frontal da peça fabricada pelo robô



Fonte: Autor (2026).

Em contrapartida, a amostra esculpida manualmente apresentou o traço do escultor, tendo suas particularidades geradas pelo gesto humano. O acabamento exibiu uma superfície mais carregada de detalhes, onde é possível notar micro variações e as marcas das ferramentas de desbaste. As linhas e arestas apresentam variações orgânicas nas transições dos planos, refletindo as dificuldades e limitações do artesão. Nesse contexto, a ausência da simetria matemática não se configura como uma falha, mas como a assinatura de autoria. A Figura 38 mostra a diferença dos detalhes das duas peças, sendo peça manual à direita.

Figura 38 – Comparação dos detalhes da peça robótica e manual, vista frontal



Fonte: Autor (2026).

Ambos os métodos ofereceram qualidades visuais distintas e complementares, enquanto a execução robótica entrega um acabamento matemático que priorizou a exatidão ao modelo digital, o processo manual trouxe a autenticidade, transformando a imperfeição em um valor estético. A Figura 39 mostra as duas esculturas na mesma vista, pode-se ver as diferenças dos traços de cada amostra, a escultura da direita é a feita manualmente e a da esquerda a peça robótica.

Figura 39 – Comparação das duas peças em mesma vista



Fonte: Autor (2026).

4.5.3 Análise dimensional

Para a comparação dimensional alguns pontos foram definidos para serem analisados, pontos como o nariz da escultura, orelha, queixo, boca e testa. Estes são os pontos onde mais se nota as diferenças dos modos de usinagem, como visualizado na análise visual e também nas imagens anexadas no Apêndice A, a Tabela 7 apresenta um resumo de todas as medidas coletadas e suas variações.

Tabela 7 – Medições obtidas das peças produzidas

Ponto Analisado	Medida Base Projeto(mm)	Medida Obtida Robótica(mm)	Variação Robótica(mm)	Medida Obtida Manual(mm)	Variação Manual(mm)
Nariz (Parte inferior)	65.70	64.6	-1.10	64.9	-0.80
Nariz (Parte superior)	35.90	35.6	-0.30	31.7	-4.20
Boca	60.60	62.7	2.10	77.2	16.60
Testa	69.90	69.8	-0.10	81.1	11.20
Queixo	118.50	117.9	-0.60	114.3	-4.20
Orelha (Comprimento)	130.00	129.1	-0.90	135.1	5.10
Orelha (Largura)	24.00	24.5	0.50	37	13.00

Fonte: Autor (2026).

Com base na Tabela 7, o método robótico provou maior precisão em relação ao método manual, que mostrou maiores diferenças de medidas. Como visto, a maior variação robótica ficou em 2.10mm enquanto no manual a maior variação foi de 16.60mm.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal estudar e desenvolver a implementação de uma célula robótica na fabricação de peças e esculturas de rochas ornamentais, visando superar os desafios impostos pelo processo de usinagem manual.

A caracterização e a simulação da célula robótica demonstraram a plena viabilidade técnica do sistema. O dimensionamento realizado para o robô articulado KUKA KR 240-2 US comprovou que o equipamento é adequado para suportar os esforços de usinagem e o peso das ferramentas. Os cálculos de esforços indicaram que a carga total representou apenas cerca de 38% da capacidade nominal do robô, o que garantiu uma operação segura, com ampla margem para absorção de forças e livre de vibrações prejudiciais.

Quanto a produtividade, os resultados comparativos entre as peças fabricadas mostraram uma diferença significativa. Embora o tempo líquido total de operação tenha sido quantitativamente semelhante entre os processos, a verdadeira vantagem da célula robótica consolidou-se na redução do *lead Time*. A fabricação robótica reduziu o tempo de entrega pela metade, este ganho ocorre devido à capacidade da máquina de operar de forma contínua.

Em relação à qualidade do produto final, a escultura produzida pelo robô apresentou precisão milimétrica em relação ao projeto original, com desvios mínimos. Em contrapartida, a peça esculpida manualmente sofreu variações significativas, evidenciando as limitações do alcance e do controle manual.

Com a implementação dessa tecnologia, o funcionário não está mais exposto diretamente às atividades insalubres e desgastantes do processo manual, assim minimizando os riscos ocupacionais e ergonômicos gerados por vibrações, ruídos elevados, ambientes úmidos e esforços físicos repetitivos.

Além disso, no que diz respeito ao custo de fabricação, a peça fabricada pelo processo robótico possui um custo mais elevado quando comparada à peça produzida de forma manual. Contudo, essa diferença financeira é superada e amplamente justificada pelos diversos outros benefícios agregados pelo sistema automatizado, conforme demonstrado ao longo do estudo.

Por fim, conclui-se que a adoção da célula robótica atendeu plenamente a todos os objetivos estabelecidos. Além de elevar significativamente os padrões de qualidade, precisão e eficiência produtiva da marmoraria.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, Carlos Rubens Araujo. **Manual de caracterização, aplicação, uso e manutenção das principais rochas comerciais no Espírito Santo: rochas ornamentais**. Cachoeiro de Itapemirim, ES: Instituto Euvaldo Lodi – Regional do Espírito Santo (IEL-ES), 2013.
- ALMEIDA, Nayssa Alem; FREITAS, João Mário Mendes. **Análise de uma célula robótica no setor de usinagem de peças automotivas através de um modelo de simulação computacional**. 2017. Disponível em: <http://repositorio.unis.edu.br/handle/prefix/786>. Acesso em: 29 out. 2025.
- ALMEIDA, Tomás Schuller de; BARBOSA, Graça. **Conceção de Célula Robótica de Polimento com Sensor de Força Ativo**. 2020. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Porto. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/122160>. Acesso em: 12 ago. 2025.
- ASIMOV, Isaac. **I, Robot**. New York: Gnome Press, 1950.
- ASIMOV, Isaac. **Robots and Empire**. New York: Doubleday, 1985.
- BAPTISTA, Inês Figueiredo. **Percursos de maquinagem realizados com robôs**. 2016. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2016. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/85399/2/143783.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- CARRARA, Valdemir. **Introdução à Robótica Industrial**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2015. Disponível em: <http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/08.25.14.16/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- CAVALCANTI, Lúcio Flávio Moreira; OLIVEIRA, Felisbela Maria da Costa; MELO, Evenildo Bezerra de; FERNADES, Amanda Cristiane Gonçalves. **Granito Azul Sucuru: caracterização tecnológica por meio do aproveitamento do material**. Revista Principia, [S. l.], v. 1, n. 33, p. 11–20, 2017. DOI: 10.18265/1517-03062015v1n33p11-20. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/848/632>. Acesso em: 29 out. 2025.
- CHEN, L. F.; HU, P. C.; LUO, M.; TANG, K. **Optimal interface surface determination for multi-axis freeform surface machining with both roughing and finishing**. Chinese Journal of Aeronautics, v. 31, p. 370–384, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2017.07.004>. Acesso em: 25 set. 2025.
- CHIODI FILHO, Cid. **Sobre a cadeia produtiva de rochas ornamentais**. Revista Brasil Mineral, São Paulo, ed. 426, jan.–fev. 2023. Disponível em: https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2023/07/Abirochas_Brasil-Mineral-Informa-11.pdf. Acesso em: 24 set. 2025.
- CUNHA, F. L. D.; OLIVEIRA, C. J. M.; FREITAS, R. A. C.; SILVA, R. L.; MARTINS, V.; MARTINS, F. N. **Utilização de sensores para obtenção de parâmetros de usinagem 3D de rochas ornamentais por meio de um robô manipulador industrial**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA (CBA), 2014. Anais..., p. 3182–3190. Disponível em: <http://www.swge.inf.br/cba2014/anais/PDF/1569933743.pdf>. Acesso em: 29 set. 2025.

DASSAULT SYSTÈMES. **SolidWorks Student Edition**. Versão 2024. Vélizy-Villacoublay, França: Dassault Systèmes, 2024. Software.

ENCY SOFTWARE LTD. **Ency CAM**. Limassol, Chipre: ENCY Software Ltd.

FREITAS, Julio César de Almeida. **Concepção, projeto e implementação de células automatizadas utilizando conceitos de programação off-line de robôs**. 2004. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2004. Disponível em: <https://www.repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/365370>. DOI: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2004.365370>. Acesso em: 31 out. 2025.

FU, K. S.; GONZALEZ, Rafael C.; LEE, C. S. G. **Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence**. New York: McGraw-Hill, 1987. Disponível em: https://www.academia.edu/28140817/Robotics_Control_Sensing_Vision_and_Intelligence. Acesso em: 22 set. 2025.

GONÇALVES, Luzan Beiriz; RODAS, Arthur de Carvalho Costa; ALVES, Diego Moreira; ARAÚJO, Gismaguino Rodrigues; JUNIOR, Javan Ataíde de Oliveira; PALMEIRA, Paulo Henrique Tavares. **Soldagem robótica aplicada a indústria automobilística: a evolução e processos adaptativos para o desenvolvimento do setor**. Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - ALAGOAS, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 85–98, 2014. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/cdgexatas/article/view/1121>. Acesso em: 21 out. 2025.

GROOVER, Mikell P.; WEISS, Mitchell; NAGEL, Roger N. **Robótica: tecnologia e programação**. McGraw-Hill, 1988.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentos da manufatura moderna: materiais, processos e sistemas**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da física**. 8. ed. v. 1. Rio de Janeiro: LTC, 2008. Cap. 9.

KLEIN, Cornelis; DUTROW, Barbara. **Manual de Ciência dos Minerais**. 23. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. Disponível em: <https://dageoufba.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/08/manual-de-cic3aancia-dos-minerais-klein-e-dutrow.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2026.

KUKA AG. **Site institucional da KUKA: robôs industriais, automação e soluções de produção**. 2025. Disponível em: <https://www.kuka.com/pt-br>. Acesso em: 2 nov. 2025.

LEDOUX, Elissa. **Robot selection guide**. Rev. 9 jan. 2023. [S. l.]: [s. n.], 2023. 6 p. Disponível em: <https://mtsu.pressbooks.pub/app/uploads/sites/121/2024/08/Robot-Selection-Guide.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2025.

MALKIN, Stephen; GUO, Changsheng. **Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives**. 2. ed. New York: Industrial Press, 2008.

NUNES AMARAL, Hudson; MOUTIN SEGORIA GASPAROTTO, Angelita. **Inteligência artificial: o uso da robótica indústria 4.0**. Revista Interface Tecnológica, Taquaritinga, SP, v. 18, n. 1, p. 474–486, 2021. Disponível em:

<https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/1107>.
<https://doi.org/10.31510/inf.v18i1.1107>. Acesso em: 26 ago. 2025.

DOI:

NGUYEN, Khuong Vinh; HATTOTUWA, Dilsha; DEWASURENDRA, Hasindu. **Design and implementation of a robotic stone machining system**. In: IEEE IAS GLOBAL CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES – GLOBCONET, 2023, London, UK. *Proceedings...* Piscataway, NJ: IEEE, 2023. p. 1–8. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10150008>. DOI: 10.1109/GlobConET56651.2023.10150008. Acesso em: 29 out. 2025.

DOI:

PETRU, C.-D.; MORARIU, F.; BREAZ, R.-E.; CRENGANIS, M.; RACZ, S.-G.; GÎRJOB, C.-E.; BÂRSAN, A.; BIRIS, C.-M. **Development of a small CNC machining center for physical implementation and a digital twin**. *Applied Sciences*, v. 15, n. 10, art. 5549, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app15105549>. DOI: 10.3390/app15105549. Licença: CC BY 4.0. Acesso em: 24 out. 2025.

PRAJWAL, B.; MALI, H. S.; NAGAR, R. **Prediction and calculation of specific cutting energy while performing milling operation on natural stone**. *Wulfenia Journal*, Klagenfurt, Áustria, v. 23, n. 12, 2016.

ROSÁRIO, João Maurício. **Robótica industrial I: modelagem, utilização e programação**. 1. ed. São Paulo: Baraúna, 2010. 494 p.

RUBIM DE CASTRO SOUZA, Renan; DREBES PEDRON, Cristiane. **Os benefícios da robótica na manufatura na era da Indústria 4.0: uma revisão sistemática da literatura**. *Future Studies Research Journal: Trends and Strategies*, v. 17, n. 1, e900, 2025. Disponível em: <https://future.emnuvens.com.br/FSRJ/article/view/900>. DOI: <https://doi.org/10.24023/FutureJournal/2175-5825/2025.v17i1.900>. Acesso em: 17 ago. 2025.

SANTOS, Winderson Eugênio dos; JÚNIOR, José Hamilton Chaves G. **Robótica Industrial - Fundamentos, tecnologias, programação e simulação** - 1ª edição - 2014. Rio de Janeiro: Érica, 2015. E-book. pág.20. ISBN 9788536530789. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536530789/>. Acesso em: 29 out. 2025.

SICILIANO, B.; SCIAVICCO, L.; VILLANI, L.; ORIOLO, G. **Robotics: Modelling, Planning and Control**. London: Springer, 2009. (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing). Disponível em: https://people.disim.univaq.it/~costanzo.manes/EDU_stuff/Robotics_Modelling,%20Planning%20and%20Control_Sciavikko_extract.pdf. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-642-1>. Acesso em: 29 out. 2025.

TED'S 3D DRUCK WELT. **Moai. Modelo 3D (arquivo STL)**. 9 maio 2025. Disponível em: <https://www.printables.com/model/1290535-moai/files>. Acesso em: 2 nov. 2025.

TSAI, M.-J.; HUANG, J.-F. **An efficient automatic polishing process using a new flexible abrasive tool**. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 30, p. 817–827, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0126-6>. Acesso em: 10 out. 2025.

VIDAL, F. W. H.; AZEVEDO, H. C. A.; CASTRO, N. F. (org.). **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013. 700 p. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1960>. Acesso em: 8 set. 2025.

ZHAO, H.; ZHANG, H.; XIN, S.; DENG, Y.; TU, C.; WANG, W.; COHEN-OR, D.; CHEN, B. **DSCarver: decompose-and-spiral-carve for subtractive manufacturing**. ACM Transactions on Graphics (TOG), v. 37, n. 4, art. 137, 2018. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3197517.3201338>. DOI: <https://doi.org/10.1145/3197517.3201338>. Acesso em: 10 out. 2025.

UNION ROBOT TECH. **How to choose the right KUKA robot model?** 26 jul. 2023. Disponível em: https://www.union-robot.com/news/news/how_to_choose_the_right_kuka_robot_model_.html. Acesso em: 1 nov. 2025.

APÊNDICE A

Medida nariz, peça robótica.



Fonte: Autor (2026).

Medida nariz, peça manual.



Fonte: Autor (2026).

Medida boca, peça robótica.



Fonte: Autor (2026).

Medida boca, peça manual.



Fonte: Autor (2026).

Medida da testa, peça robótica.



Fonte: Autor (2026).

Medida da testa, peça manual.



Fonte: Autor (2026).

Medida do queixo, peça robótica.



Fonte: Autor (2026).

Medida do queixo, peça manual.



Fonte: Autor (2026).

Medida da orelha, peça robótica.



Fonte: Autor (2026).

Medida da orelha, peça manual.



Fonte: Autor (2026).